

# 人工源电磁技术在油气勘探中的应用

刘雪军<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国石油集团东方地球物理公司, 河北 072656)

**[摘要]** 文章介绍了应用于油气勘探的几类人工源电磁法的基本情况, 既包括目前国内已经普遍采用的固定源建场测深法(FTEM)、可控源音频大地电磁测深法(CSAMT), 也包括正处于开发引进阶段的两分量时频电磁法、井地建场激电法, 结合勘探实例重点对比了这几种方法的优缺点和应用前景, 同时也就今后的发展方向进行了分析。

**[关键词]** 油气勘探 人工源 电磁法

**[中图分类号]** P631.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2003)S0-00010-05

## 0 前言

油气勘探能否取得良好的地质效果, 除了根据不同物性、地质条件合理选择方法和技术外, 还决定于多种物化探、地质、钻探手段的综合运用。综合物化探方法(重磁电化等)能从多个侧面反映勘探目标的属性, 而其中的电磁法, 尤其是人工源电磁法又占据了重要的地位。随着仪器的持续改进、正反演模拟技术的广泛采用、计算速度的快速提高和新方法新理论的不完善, 人工源电磁法在油气勘探中的应用也越来越广泛。

## 1 固定源建场测深法(FTEM)

是瞬变电磁测深(TEM)的一种, 通过研究瞬时变化的电磁场在地球导体中的传播规律来探测地下电性分布。施工装置由发射和接收两部分组成, 通过有限长度的接地导线向地下发送阶跃状方波, 电流瞬时逆变时, 因电磁感应而产生类似于窄脉冲的感应电动势, 在地下激发二次涡旋电流, 随着感应电流向下移动、扩散, 在地表接收到的磁场信息相应地包含了由浅至深的岩层信息。测深过程类似于地震勘探用震源激发和用检波器接收的过程。

目前国内采用的发射功率达到 250 kW, 最大供电电流 150 A, 探测深度接近 10 km。对于具有高阻基底的多层断面, 瞬变响应的观测值与总纵电导之间的关系为:  $B_z \approx S^3$ , 相对于垂向电测深和频率域大

地电磁测深(MT)而言, 其反应更为灵敏, 垂向分辨率更高。由于采用大功率人工场源覆盖一定的勘探区域, 缩小了空间体积效应的范围, 提高了探测的局部性, 而且观测的是垂直磁场分量, 避免了由于电场观测所引起的静电畸变, 信号可以多次重复叠加, 提高了信噪比, 有利于研究局部目标体, 因此横向分辨率也更高。

通过求取视电阻率  $\rho(t)$  和纵向电导  $S(t)$  参数, 一方面进行反演可得到深度—电阻率断面, 反映剖面纵横向宏观的电性变化信息。另一方面可采取提取剩余异常场方法, 沉积盆地最具有代表性的背景断面是下部高阻结晶基底, 上部导电沉积盖层的二层介质模型, 因此可消除宏观的大地背景响应, 得到剩余异常场, 反映地层纵向的电性差异, 突出薄层微弱信息, 提高对断面的分辨率。

### 实例: TZ 碳酸盐岩深层

塔里木盆地 TZ 隆起, 近几年在下古生界奥陶—寒武系灰岩地层中屡有突破。特别是 TZ162 井在这套白云岩段获高产气流, 更引起了地质家们的高度关注。但由于白云岩与灰岩波阻抗差很小, 加之奥陶系地层埋深较大, 地表地质条件又较复杂, 因而单一依靠地震资料研究深部构造及进行岩性对比效果不太理想。另一方面, 高阻碳酸岩中的这类产气白云岩段往往具有较大的孔隙度和较围岩低得多的电阻率, 因此针对这种电性特征, 开展了的大功率建场测深勘探。图 1a、b 展示了建场测深的剩余异

[收稿日期] 2003-08-18; [责任编辑] 苗国航。

[作者简介] 刘雪军(1970年-), 男, 1992年毕业于中国地质大学(武汉)物探系, 获学士学位, 在读硕士学位, 现主要从事油气地球物理勘探工作。

常场剖面、深度成像剖面,可以看出下古生界碳酸盐岩内存在一些厚度较薄和电阻率相对低的电性层,与已知井对比表明,这正是碳酸盐岩内空隙发育的低阻储集层。根据面积性工作后,对该区油气有利目标进行了预测。获得了很有指导意义的资料。

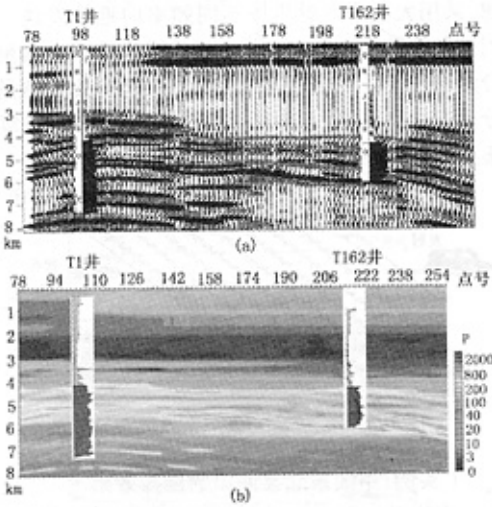


图1 TZ地区固定建场测深剖面成果  
a—剩余异常场剖面;b—深度成像剖面

两种,油气勘探中常用的是电性源,沿一定方向布置接地导线 AB,长度一般为 1~3 km,向地下供入频率为  $f$  的交变电流,形成交变电磁场。在 AB 一侧或两侧 60 度张角的扇形区域内,平行 AB 布置测线,逐次改变供电频率,观测沿测线方向相应频率的电场分量  $E_x$  和与之正交的磁场分量  $H_y$ ,便可计算出每个测点随频率变化的视电阻率和阻抗相位,达到频率测深的目的。

CSAMT 法的显著特点是工作效率高,探测深度适中。人工场源克服了天然场源信号弱的不足,横、纵向分辨能力较强,是研究地质构造、进行地质立体填图和直接找矿的有效手段。

**实例:沁水盆地 CSAMT 勘探**

沁水盆地奥陶系顶面最大埋深不足 3000 m,正处于 CSAMT 法的有效勘探深度内,且盆地地层具有明显的电性差异,表现为低—高一低—高的特征,第三电性层(二叠系)为沁水盆地的一套稳定的低阻标志层,厚度约 720~1060 m,第四电性层(石炭系)为本区的高阻标志层,各套电性层在区域上稳定,可以连续追踪,是进行 CSAMT 勘探的理想地区。

南马会背斜电法与地震成果(图 2)对比可以看出,背斜构造的走向、形态吻合较好。如地震以海拔 -1150 m 圈闭,而电法以海拔 -1100 m 圈闭。地震南②断层和南③断层,在电法剖面上反映为密集的等值线梯度异常带,目标电性层的起伏形态与地震相同。

**2 可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)**

CSAMT 采用人工场源供电,其频率范围为 0.25~8192 Hz,CSAMT 法所观测电磁场的频率范围、场强和方向可由人工控制。施工装置由发射(Tx)和接收(Rx)两部分组成,人工场源有电性源和磁性源

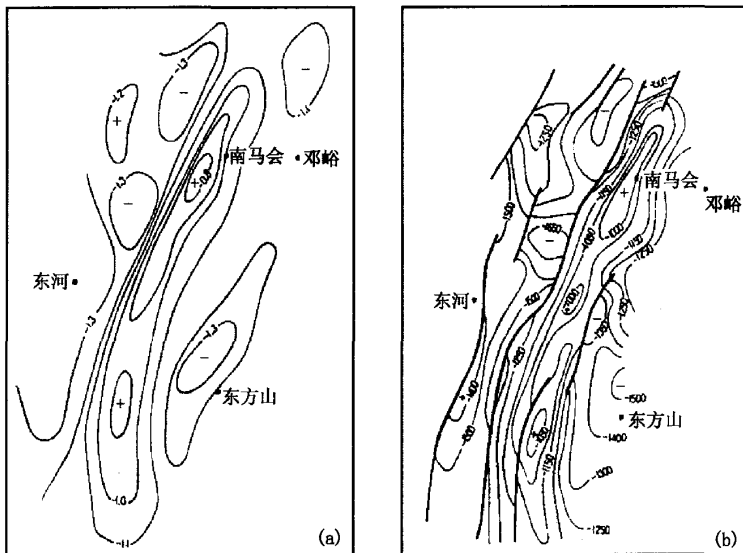


图2 南马会背斜电法与地震结果对比图  
a—CSAMT 第四电性层顶面构造图;b—地震 T12 反射层顶面构造图

1989~1995年,通过9876 km<sup>2</sup>的面积详查,在沁水盆地落实并发现36个一定规模的局部异常,划分34条断裂。对一些构造钻探后发现了天然气富集区。榆社地区在CSAMT法详查工作的基础上部署了地震勘探工作,其揭示的8个构造,有7个与CSAMT结果吻合,吻合率87.5%。

### 3 两分量时频电磁法

岩石的空间结构、油气的饱和度和矿化水的组成等会影响储集层的物理特性,油气藏在正常背景上会产生局部的电导率和极化率异常。具体可以归结为:(1)电阻率 $\rho$ :油气的电阻率比地层水高一个数量级以上,因此当储集层孔隙中充满油气时其电阻率明显高于围岩,特别是在砂岩储层中油藏表现为明显的高阻。(2)极化率 $\eta$ :油气藏上方存在由以下几方面因素引起的明显的极化异常:①油气藏上方一定深度的黄铁矿含量高于没有油气藏时黄铁矿的含量;②油气藏本身的存在会生成自然电场,该电场在没有受到外电场作用下处于平衡状态,当受到外界电场作用时,电荷的流动会形成极化异常;③在油藏下部油气接触面附近,轻质成份少,主要为重烃成分,化学反应活跃,重烃本身存在一定的极化率,形成第三个极化率源,其异常表现为高频短周期特征。

储集层含油气后表现为纵横向的电阻率变化和横向上的极化率变化,变化的程度与油气藏本身性质有关和激发源的频率变化有关。在地表,电磁场的频率函数符合电磁感应定律,也就是岩石的电导率与频率有关,可把这种效应分为电动力学(感应)效应和极化效应(激发极化),感应和极化程度取决于场频率值、装置类型、场分量和测量的值等。研究表明,电磁场的 $\text{dBz}/\text{dt}$ 和 $E_x$ 分量具有高分辨能力,在一定频段内,测量这两个分量在固定频段的振幅、相位值和不同频率之间的相对差,并且研究其时间-频率特性,可以较容易地确定信号感应部分和极化响应,从而得到断面的电导率和极化率信息。该方法具有如下特点:①同时测量电分量和磁分量,弥补了只观测磁场对高阻薄层分辨率低的不足;②同时研究电阻率、纵向电导、极化率和双频相位等多个参数,不但可以研究电性构造,还可以研究目标体的电阻率和层极化性;③在采集方面,激发频谱已知,可多次重复观测,利用叠加、滤波等手段抑制噪声干扰,大大提高信噪比;④资料处理方面应用电介质的频散理论,从观测曲线中分离出微异常,可反演目

标层位的电性参数,提高了研究精度;⑤资料解释方面注重采用地震及井的资料进行约束,并标定解释,提高成果的准确性。

两分量时频电磁法的野外施工布置见图3,发射端由多根并联的铜导线构成水平有限长度接地线源,采用大功率发射机按不同频率向地下发送一系列直角状脉冲电流,接收端通过接地线MN测量电分量 $E_x$ 、通过不接地线圈或是高灵敏度磁棒测量磁分量的垂直导数( $\text{dBz}/\text{dt}$ ),由于实现了多道连续密集采样,其工作效率较高。

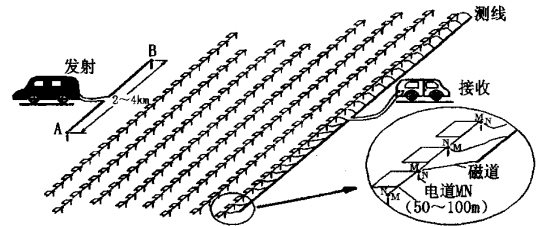


图3 两分量时频电磁法野外施工布置图

#### 1 实例:中国东北某油田的勘探效果

该油田位于东北某斜坡区,目的层深度400~1000 m,在预测的含油气构造上方布置了567和570两条测线(图4a)。频率域处理获得激发极化双频相位异常,并且利用谐波域的反演结果获得了目的层沿剖面的电阻率分布(图4b),可以看出激发极化异常最明显的区段位于探区西部,异常幅度达到 $0.8^\circ \sim 1.0^\circ$ ,相应区段内目的层电阻率是在正常背景之上明显的高阻异常,符合该区含油构造的典型特征。时间域内对磁场垂直分量导数进行处理,并利用钻井资料建立的综合地电模型进行标定后,获得如图4c、d所示的时间剖面,剖面反映出探区具有受断层控制的块状构造。研究确定了激发极化异常与电阻率异常区在断块内的对应性。利用所获得的异常参数,勾绘了本区的异常平面图(图4e),并预测了本区两个有利的含油区块,其结果与钻探结果一致。

### 4 井地建场激电法

井地建场激电法是根据地层存在激发极化效应时电导率产生频散现象,在综合频率测深和地面激发极化法的基础上发展起来的一种高分辨率电磁法,它结合了固定源建场测深法和两分量时频电磁法的优点。当地层存在激发极化效应时,向地下发射交变的方波电流,测得两接收电极之间的电位差和相位都随供电的频率而变化,因而计算出的电导

率也随频率而变化。研究和实践表明,将发射极分别置于油藏的上、下方(图 5),分别观测极化效应和频散现象,在油藏内外所测得

明显的差异,不同供电频率所产生的变化也不尽相同。因此,利用这种差异和变化的不同能准确地确定油藏的范围和边界及相邻区块的含油性。

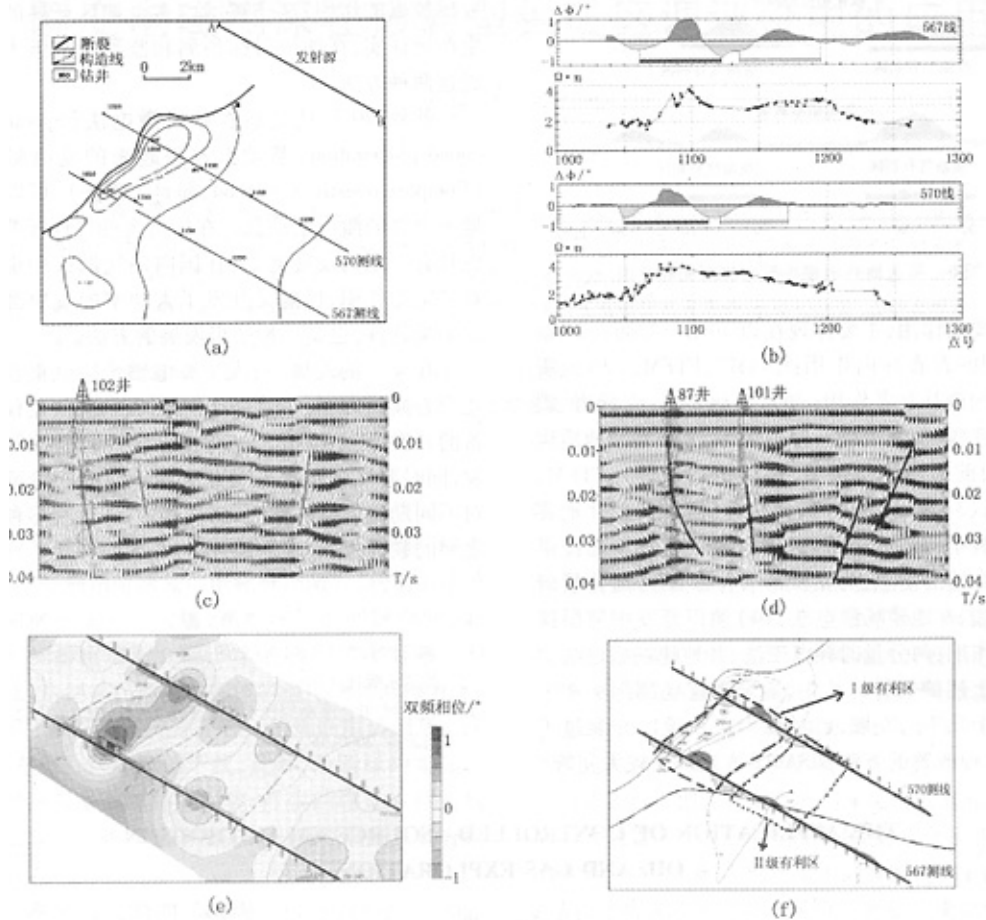


图 4 中国东北某油田两分量时频电磁法勘探效果图  
a—测线布置;b—567 线和 570 线的目的层电阻率和双频相位异常;  
c—567 线时间剖面;d—570 线时间剖面;e—激发极化平面异常特征;f—有利区预测

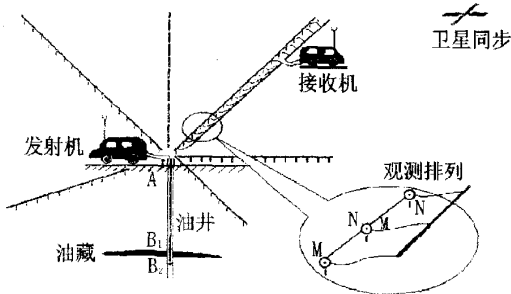


图 5 井地建场激电法野外施工示意图

实例:中国西部某盆地应用效果

某盆地 QLK 油田在 seismic 三维勘探探明的背斜

构造上,围绕油井开展了多条测线的井地建场激电法,其目的是探明有利的油气储集区,为钻探提供依据,通过对各剖面的极化相位、极化相位差、层间电阻率异常的综合解释(图 6),指出位于恰 1 井所在的中部断块及与其相邻位于断块下降盘的恰 1 井北断块有一级油气有利区,同时还指出其它三个区块为二维含油气有利区。

5 结语

人工源电磁法以其方法种类多(可以针对不同的地质目标进行相应的研究)、资料信噪比高、勘探深度大、解释精度高等优点,在油气勘探中发挥了越

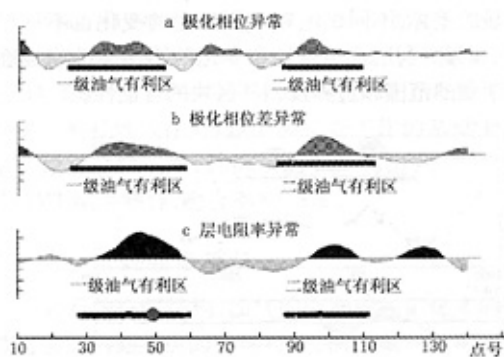


图6 某盆地井地建场激电法剖面异常图

来越重要的作用,主要体现在以下几个方面:(1)新区、外围的普查导向作用:CSAMT、FTEM;(2)地震困难区的镶补参考作用(如复杂地表区:玄武岩、碳酸盐岩裸露区、地表砾石覆盖区等,又如复杂地质构造区:山前带逆掩推覆带、高陡构造带等):FTEM、CSAMT;(3)油田勘探中的预测评价作用(如在地震已精确查明构造的地区,对构造的含油气情况提供重要而有效的信息,为钻探部署作参谋):两分量时频电磁法、井地建场激电法;(4)油田开发中储层描述监测作用:两分量时频电磁法、井地建场激电法。

在上述的几种方法中,固定源建场测深法在国内经过十几年的发展,已经在十余个地区开展过工作,是一种成熟的方法;CSAMT方法理论较为完善,

国内的仪器设备、施工方法、资料处理解释方法等都很成熟;而两分量时频电磁法、井地建场激电法正处于研究和引进阶段,因为在油气边界的预测中可以发挥较好的作用,这已被国内多个地区开展的试验生产所证实,在油气目标预测和监测中应该大力发展这两种方法。

此外,70年代之后在频谱激电法(Spectral induced polarization)基础上发展起来的复电阻率法(Complex resistivity method,简称CR法),可以获得地下可靠的激电谱信息。在构造含油气性预测方面也具有一定的发展前景,在国内油气勘探中也发挥着一定的作用,目前又开发了大功率的发射源和新的采集软件,也是一种值得发展的方法。

在今后的发展中,人工源电磁法应该重点研究几个方面的内容:一是基础理论的研究;二是仪器设备的开发;三是模拟、正反演、综合解释软件等的开发,同时要注意发挥不同方法在不同勘探阶段和针对不同勘探目标的作用,扬长避短,并重视多种方法之间的联合,走综合勘探之路。

#### [参考文献]

- [1] 武汉地质学院金属物探教研室编. 电法勘探教程[M]. 北京:地质出版社,1980.
- [2] 何展翔. 非地震勘探技术的进步与发展趋势[J]. 石油地球物理勘探,2000,35,(3).

## THE APPLICATION OF CONTROLLED - SOURCE EM METHODS IN OIL AND GAS EXPLORATION

LIU Xue - jun<sup>1,2</sup>

(1. China University of Geosciences ( Beijing ), Beijing 100083;

2. BGP Nonseismic Survey, CNPC, P. O. box 1, Gucheng, Dingxing, Hebei 072656)

**Abstract:** In this article, a few kinds of controlled - source methods applied to oil and gas exploration are introduced, including FTEM and CSAMT which have become popular at home, as well as two - components time - frequency EM and well - ground TEM which are still on a test stage. Combining with some case histories, the advantages, limitations and prospects of these methods are discussed and with way forward of these methods analyzed.

**Key words:** oil and gas exploration, controlled - source EM method