

海底油气藏及天然气水合物的时频电磁辨识

罗维斌<sup>1,2</sup>, 汤井田<sup>2</sup>

(1. 长安大学地测学院, 西安 710054; 2. 中南大学信息物理工程学院, 长沙 410083)

**摘 要** 提出了伪随机多频海洋电磁法观测方案. 采用伪随机多频信号作为激励场源, 多偏移距同线偶极-偶极同时观测, 相关辨识海底地电系统的频率特性和冲激响应, 可以在时间域和频率域同时辨识海底高阻薄层. 在时间域, 瞬变冲激时刻可以直接指示海底地层电导率的变化; 在频率域, 利用多个频率的电场响应计算的频散率及其道间变化量, 相对相位道间变化量对高阻薄层有很好的反映. 从而实现对海底油气及天然气水合物的多参数辨识.

**关键词** 伪随机海洋电磁法, 相关辨识, 瞬变冲激时刻, 频散率道间变化量, 相对相位道间变化量

**中图分类号** P631      **文献标识码** A      **文章编号** 1004-2903(2008)06-1841-08

Identification of seafloor hydrocarbon reservoir and gas hydrate using controlled-source electromagnetics in time and frequency domain

LUO weibin<sup>1,2</sup>, TANG jing-tian<sup>2</sup>

(1. Chang'an University, School of Geological Engineering and Geomatics, Xi'an 710054, China;  
2. Central South University, School of Inf or physics and Geomatics Engineering, ChangSha 410083, China)

**Abstract** The pseudorandom multi frequency marine controlled source electromagnetic method is proposed in this paper. Two types of pseudorandom multi frequency are adopted as source signal. The electric field response are simultaneously observed with multi electric dipole receivers configuring inline with the source dipole. The frequency characteristics and impulse response of the seafloor geoelectric system are identified at the same moment. So the seafloor thin resistor can be detected both in the time domain and frequency domain. The transient impulse peak time can be an indicator for seafloor conductivity in the time domain. The percent frequency effect, differentiation of percent frequency effect with offset and differentiation of relative phase with offset computed with multi frequency electric field response can be used to detect the seafloor thin resistor in the frequency domain. So the seafloor hydrocarbon reservoir and gas hydrate can be identified by multi parameters.

**Keywords** pseudorandom multi frequency marine controlled source electromagnetic method, correlation identification, transient impulse peak time, differentiation of percent frequency effect with offset, differentiation of relative phase with offset

0 引 言

海上地震是勘察海底油气及天然气水合物最主要的方法, 它可以精细地描绘可能的油气构造. 但它的一个主要的缺点是不能区分构造中含的是油还是水, 因为构造中含油饱和度的变化对地震波的波速影响不明显<sup>[1]</sup>. 另外地震对天然气水合物勘察的一

个主要的识别标志是似海底反射层( BSR)<sup>[2, 16]</sup>, 而“BSR”并不是处处都对应天然气水合物, 有的天然气水合物蕴藏区并没有明显的“BSR”( Sloan, 1990). 而利用海洋可控源电磁法( mCSEM) 则有可能达到探测海底油气及天然气水合物的目的. 因为构造中油水饱和度变化可以引起岩层电阻率显著的变

收稿日期 2008-02-10; 修回日期 2008-05-20.  
基金项目 国际大洋“十五”科技攻关计划(DY105-03-01-13)和国家“863”计划项目(2006AA06Z105)联合资助.  
作者简介 罗维斌, 男, 1972 年生, 甘肃景泰人, 博士, 主要从事电磁场理论和方法应用研究. (E-mail: lwbcu@163.com)  
© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

化<sup>[1,3]</sup>. 含油气储藏的电阻率要比含水储层的电阻率高 1 到 3 个数量级. 油层的高电阻率与围岩的低电阻率形成明显的电性差异<sup>[1]</sup>. 而天然气水合物同样具有高电阻特性. 因而, 能分辨电阻率差异的可控源低频电磁测深法成为探测海底油气藏及天然气水合物的有效方法<sup>[2~4]</sup>. 近几年来, mCSEM 在海底油气勘探的成功案例表明, 这一方法不仅是对地震勘探的有益补充, 联合应用可以很大程度上提高钻孔成功率, 降低勘探风险, 节约巨额勘探费用, 而且可以直接指示油气, 应用于地震难以勘探以及还没有勘探的区域.

海洋是一个特殊的电磁环境, 电磁波在海水中的传播满足扩散方程, 在高阻层中扩散的快, 传播的远. 较低的信号频率或传导媒质的电导率低, 则有较大的趋肤深度. 因而 mCSEM 有利于对高阻层的分辨<sup>[11]</sup>. 在海底激发的电磁能量由于直接经海水扩散和经海底地层扩散的速度不同, 因而在适当的收发距这两个电磁能量到达的时间是分开的, 首先到达的是经相对高阻的海底地层扩散来的电磁能量, 它的到达时间可以直接指示海底电导率的变化<sup>[1~5, 8, 13]</sup>. 而要检测这种电磁能量到达时间的变化, 必须多偏移距同时测量, 这是海洋可控源电磁法一个显著的特点, 不管是频率域测量还是时间域测量都是如此. 在频率域表现为给定频率的信号在适当的收发距电场强度幅度和相位的变化.

用可控源电磁法探测海底油气藏及天然气水合物, 目前主要有两种成熟的方法. 一种叫做海底似测井 (Seabed logging, SBL)<sup>[1, 6, 7, 9, 10, 12]</sup>, 这种方法用下沉至近海底 (距离海底 40~50 m) 的水平电偶极作场源, 发射 0.01 Hz 至 10 Hz 的几个离散频率的方波电流, 几十个电磁场接收器沿测线投放在海底, 自主测量由电偶极场源激励的基波或三次谐波的稳态电磁场响应. 所有的接收器要与发射器严格时间同步. 电偶极场源沿测线拖动一次, 完成一个频率的测量, 要完成几个频率的电磁场测量, 电偶极源要来回拖动几次. 是一种变频法测量方式.

另一种方法叫多道瞬变电磁法 (multi transient electromagnetic, MTEM)<sup>[2, 8, 13]</sup>. 它是英国 MTEM 公司的专利技术. 这种方法采用同线偶极-偶极装置, 多个电偶极子接收器与发射偶极子以不同的收发距同线排列. 场源信号采用上阶跃波或者是伪随机二进制序列 (PRBS). 同时记录发射电流和多偏移距的电场响应. 通过解卷积运算去除观测系统响应的影响, 得到大地的冲激响应和阶跃响应. 利用冲激

响应峰值的时间信息推断地下电导率的分布. 这种方法可以应用于陆地和海洋, 是一种时间域电磁法. 虽然应用了宽频带的场源信号, 但只是在时间域辨识大地系统的冲激响应, 只用到了冲激响应的峰值时间信息和电阻率参数.

虽然在时间域观测可能会得到更好的结果, 但是目前海洋可控源电磁法多在频率域观测一个或几个离散频率的电场, 通过数值模拟对比, 推断海底的电导率分布. 只用了电导率参数来推断是否有油气储层. 而激发极化法或谱激电法也是勘探石油天然气有效的非地震勘探方法<sup>[14, 15, 17]</sup>. 油气藏本身具有与围岩明显不同的物理化学性质. 油气会向上渗透迁移, 在储层上方形成黄铁矿化晕, 这为激电法找油气储藏提供了物性前提.

本文通过一维数值模拟计算, 利用油气储层的高电阻率和高极化率特性, 提出了采用宽频带的伪随机信号作场源的伪随机海洋可控源电磁法时频观测方案. 基于多频伪随机信号激励, 采用水平电偶极-偶极装置多偏移距同时测量的观测方式, 在时间域提出的瞬变冲激时刻道间变化率, 在频率域提出的频散率道间变化率以及相对相位道间变化率等几个电性参数, 对海底高阻薄层有很好的分辨能力, 达到对海底油气及天然气水合物储层的多参数辨识.

## 1 伪随机海洋可控源多道电磁法

### 1.1 观测方式

如图 1 所示, 采用多偏移距同线偶极-偶极装置, 一个或几十个电偶极接收器以不同的收发距与发射接地电偶极同线排列, 各接收器之间等间距. 收发器之间严格时间同步, 用系统特性相同的接收器同时采集发射电流信号和多偏移距的电场响应信号. 采用伪随机多频信号作为激励信号, 伪随机信号可采用  $2^n$  系列伪随机信号<sup>[18]</sup> 和逆重复  $m$  序列伪随机信号<sup>[19]</sup>. 这样, 一次测量就能得到多个频率, 多个收发距的径向电场响应.

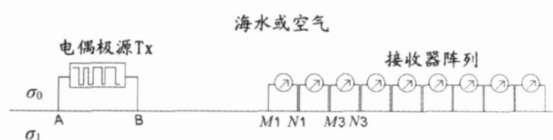


图 1 多偏移距偶极-偶极观测系统工作布置图

Fig. 1 Multi offset inline dipole dipole survey system configuration

根据这种工作方式, 同线排列的多个接收器同时接收发射偶极激励的电场响应, 是一种几何测深装置. 由于收发距按一定的间距增加, 不同的收发距探测的深度不同, 收发距越大反映的深度越大, 因此在一个供电点一次供电, 就可以接收到不同深度的多个频率的电场响应. 沿剖面按一定的点距多次移动观测系统, 就可观测到一条剖面上不同收发距的多个频率的径向电场响应, 获取了丰富的电场信息. 在海洋可采用与海底似测井 (SBL) 相同的作业方式, 或者将发射电偶极与多个接收器用同一根缆绳拖曳式作业, 只观测轴向电场分量.

1.2 伪随机多频场源信号

本文拟选定  $2^n$  系列伪随机信号和逆重复  $m$  序列伪随机信号作为激励信号.  $2^n$  系列伪随机信号的  $n$  指的是所含主频率个数, 是可变的, 一般为奇数, 如  $n=3$  是三频波, 含三个主频率, 相邻主频率递增的频比是 2. 随  $n$  的增加, 信号频带变得越来越宽. 信号在一个周期内是随机的, 但可以重复产生, 因而也是周期信号. 图 2 是低频频率为  $1/16\text{ Hz}$  的一个周期的九频波波形和功率谱, 从图中可以看出它的频谱包含了九个能量集中的主频率, 最低主频率  $1/16\text{ Hz}$ , 最高主频率  $16\text{ Hz}$ , 主频率从最低频起相邻主频率之间的频比是 2. 一次供电, 就可覆盖海洋可控源电磁法的常用频率范围, 得到 9 个频率的电场响应.

由  $n$  位线性反馈移位寄存器循环产生的最长序列叫  $m$  序列, 对  $m$  序列隔位取反就产生了逆重复  $m$  序列.  $m$  序列的信号长度是  $2^n - 1$  位, 其中  $n$  是移位寄存器的位数, 逆重复  $m$  序列的信号长度是  $m$  序列的信号长度的 2 倍. 逆重复  $m$  序列和  $m$  序列有很好的自相关特性. 逆重复  $m$  序列具有逆重复性, 是一种宽频带信号, 线状谱在频带内等间距分布, 在系统辨识中已得到广泛应用<sup>[19]</sup>. 图 3 是仿真产生的 11 级的逆重复  $m$  序列, 时钟频率取  $128\text{ Hz}$ , 则产生的伪随机信号最低频率是  $0.0313\text{ Hz}$ , 从  $0.0313\text{ Hz}$  到  $8\text{ Hz}$  就覆盖了 128 个主频率, 主频率密度大. 信号的序列长度及所包含的频率范围可通过改变移位寄存器的位数及激励时钟频率等参数灵活控制.

本文论述的伪随机海洋电磁法时频观测方案中, 发射设备包含了这两种信号的产生和大功率输出. 且信号波形和信号的频率范围选择方便. 这样在应用中一次供电就可向地下同时发射多个频率的信号电流. 接收设备具有 GPS 时间同步功能, 可定时采样. 采用 24 位 sigma delta A/D 采样技术, 可以大

动态范围采集微弱信号. 各接收器具有相同的系统特性.

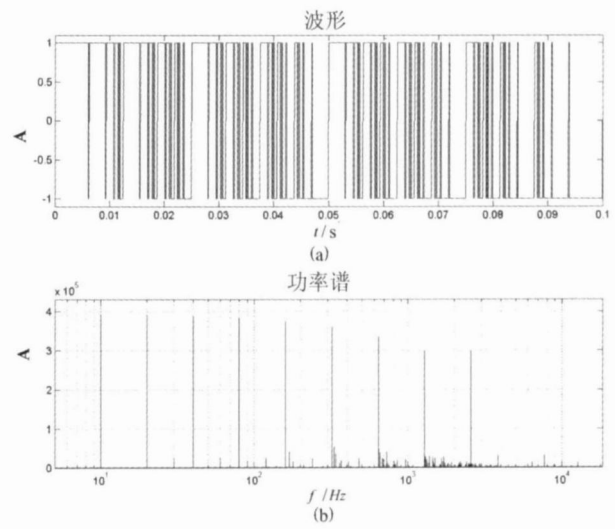


图 2  $2^n$  系列九频波波形时序图及功率谱  
(基频  $f_0=1/16\text{ Hz}$ )  
Fig. 2 Time waveform(a) and power spectra (b) of series  $2^n$  with nine frequency pseudorandom signal

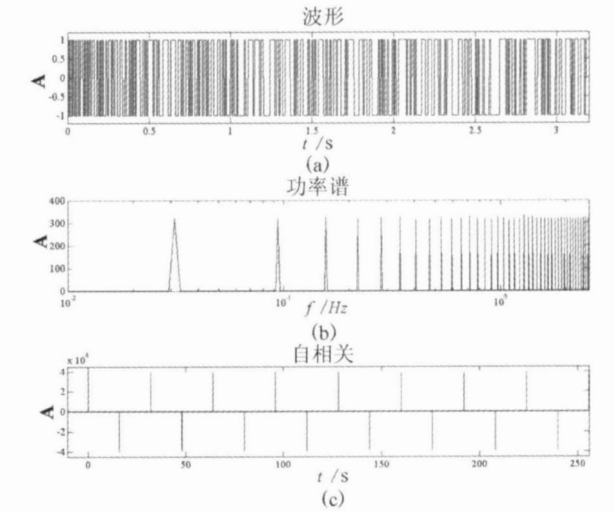


图 3 逆重复  $m$  序列的波形时序图(a)、  
功率谱(b)及其自相关函数(c)  
Fig. 3 Time waveform(a), power spectra (b) and autocorrelation function (c) of inverse repeated  $m$  sequence of pseudorandom signal

2 海底油气及天然气水合物储层的时频电磁辨识

2.1 辨识原理

如果把海洋地质环境, 海水及海底地层看作是

一个复杂巨系统,海洋电磁法就是对这个复杂巨系统的参数辨识.分析该系统对激励信号的响应,可获得需要的地下信息.系统特性由系统的脉冲响应函数  $h(\tau)$  和频率响应函数  $H(\omega)$  描述.用阶跃法和频率法辨识地电系统缺点是工作效率低,精度差,抗干扰能力弱.赵璧如等人介绍了应用伪随机相关辨识思想设计的电测系统样机及应用实例<sup>[20]</sup>,表明这种方法具有良好的探测能力和效率. Bruce Hobbs 等人开发的 MTEM 也采用了这一思想,用上阶跃波或双极性  $m$  序列伪随机作场源,来辨识地质模型的冲激响应<sup>[2,8,13]</sup>.本文提出利用逆重复  $m$  序列辨识地电系统的方法,并设计了相应的发送机系统<sup>[21]</sup>.

如图 4 所示,接收器记录的电磁场响应不仅有大地系统响应,还有观测系统自身的系统响应<sup>[2,8,13]</sup>.

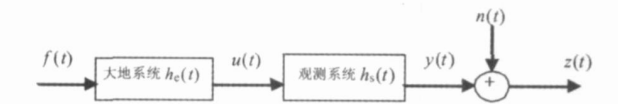


图 4 相关辨识观测系统模型

Fig. 4 Model of correlation identification observation system

用卷积表示记录的系统响应

$$z(t) = y(t) + n(t)$$
$$= h_s(t) * h_e(t) * f(t) + n(t), \tag{1}$$

式中  $*$  表示卷积运算,  $h_e(t)$  是未知的大地系统冲激响应,  $h_s(t)$  是观测系统冲激响应,  $n(t)$  是不相关的噪声,  $f(t)$  是场源激励信号.由上式可知,要得到大地系统冲激响应,首先要已知观测系统冲激响应  $h_s(t)$ .观测系统冲激响应可通过直接记录发射电流,与同步记录的电场响应解卷积得到:

$$h_s(t) = i(t) * r(t), \tag{2}$$

式中  $i(t)$  是发射电流,  $r(t)$  是与场源有一定收发距的电场响应,电流记录器与电场记录器有几乎相同的系统特性.对于相同的接收器,有相同的观测系统冲激响应.

对式 (1) 求输入与输出信号的互相关,由于噪声与激励信号不相关,因而其互相关等于零,有

$$R_{zf}(\tau) = h_s(\tau) * h_e(\tau) * R_{ff}(\tau), \tag{3}$$

对上式进行拉普拉斯变换,在复数域有

$$S_{zf}(s) = H_s(s)H_e(s)S_f(s), \tag{4}$$

式中  $S_{zf}(s)$  和  $S_f(s)$  分别是互相关  $R_{zf}(\tau)$  和自相关  $R_{ff}(\tau)$  的拉普拉斯变换,则可求得大地系统的传递

函数,将拉氏变量  $s$  用  $j\omega$  代换,系统频率特性为

$$H_e(j\omega) = \frac{\left[ \frac{S_d(j\omega)}{S_f(j\omega)} \right]}{H_s(j\omega)}. \tag{5}$$

当激励信号采用逆重复  $m$  序列伪随机信号时,式 (5) 是很容易求解的.对式 (5) 进行反拉普拉斯变换,可得到海洋地电系统的冲激响应.

2.2 数据分析

由本文提出的时频观测方案和时频辨识原理,同一个供电点,多偏移距、多个频率的电场响应是同时测得的,每个接收器的系统特性相同,因而可以从这些数据中提取一些能明显反映地下电性变化的参数.

2.2.1 时间域瞬变冲激时刻

采用逆重复  $m$  序列伪随机信号相关辨识可以很方便地得到海洋地电系统的冲激响应.本文作者编制程序计算了水平电偶极-偶极装置,海洋双半空间以及海洋层状模型的阶跃响应和冲激响应.计算结果表明,冲激响应的第一个峰值时刻反映电磁能量经海底地层的扩散速度,我们将其称为瞬变冲激时刻,它可直接指示海底地层电导率的变化,是时间域海洋 CSEM 的重要参数.

下面是一个计算实例,为了减小海水深度对瞬变冲激时刻的影响,设海水足够深,取海水深度  $sd_0 = 3000$  m,海水电导率取  $3.2$  S/m.海底地层层参数如表 1 所示.计算中收发距取  $800 \sim 4000$  m,间隔  $100$  m.

表 1 海底地层层参数

Table 1 Layer parameter of seafloor strata		
海底地层层序	层电导率 (S/m)	层厚度 (m)
1	0.2	800
2	0.001	30
3	0.2	无穷深

图 6 是对图 5 中第一个峰值时刻,即瞬变冲激时刻求相邻收发距的冲激峰值时间到达的相对变化量,用  $t(r_{i+1}) - t(r_i)$  计算,我们称之为道间变化量,其中  $t(r_i)$  表示收发距为  $r_i$  时的瞬变冲激时刻.从图 5 和图 6 中可以看出,电导率为  $0.001$  S/m,层厚  $30$  米的高阻薄层在埋深  $800$  m 的情况下,能够引起瞬变时刻及其道间变化率随收发距的明显变化.瞬变时刻在适当的收发距上发生转折,即瞬变时刻提前了,而瞬变时刻道间变化量则表现为随收发距增大而逐渐变小并在  $(r = 2800$  m) 时小于零,这个极距

约是高层埋深的 3.5 倍. 这说明多偏移距同时测量, 在适当的收发距可检测到高阻薄层的存在, 瞬变冲激时刻的道间变化率由正变负的过零点反映更灵敏, 利用过零点对应的收发距可推断高阻层的埋深.

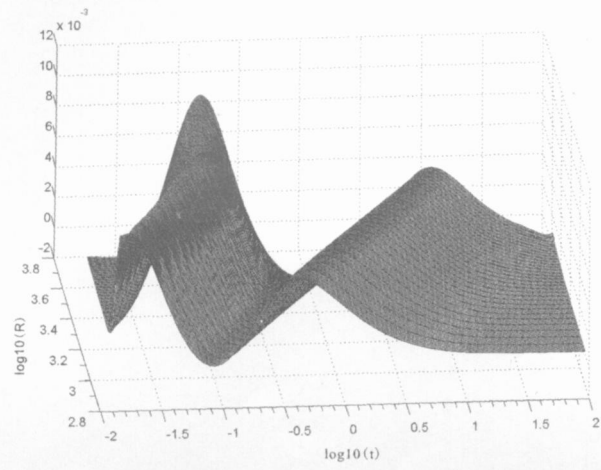


图 5 地质模型的多个偏移距的冲激响应  
Fig. 5 Impulse response of model with multi offsets

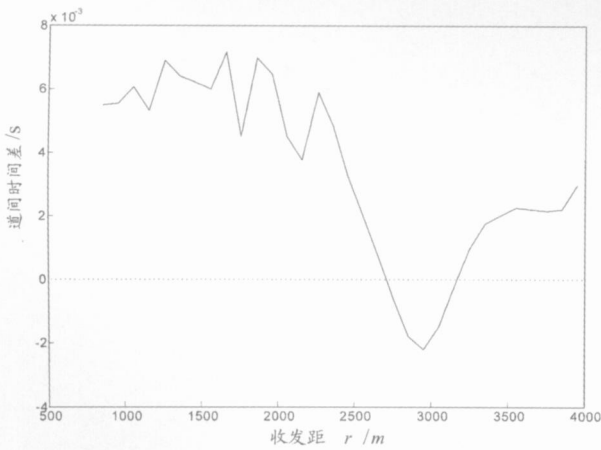


图 6 瞬变冲激时刻的道间变化量  
Fig. 6 Variation of transient impulse peak time with offset

2.2.2 频率域的几个电性参数

在频率域将给定收发距和给定频率的电场响应用幅度和相位表示:

$$E(j\omega_k, r_i) = A(\omega_k, r_i)e^{j\varphi(\omega_k, r_i)}, \tag{6}$$

式中  $\omega_k, k = 1, 2, \dots, m$  为角频率,  $r_i, i = 1, 2, \dots, n$  为收发距.  $A(\omega_k, r_i)$  表示相应频率和收发距的电场幅度,  $\varphi(\omega_k, r_i)$  表示电场的相位.

由此可定义四个参数:

(1) 频散率, 或频率百分比效应

$$P_{FE}(r) = \frac{A(\omega_D, r) - A(\omega_G, r)}{A(\omega_G, r)} \times 100\%, \tag{7}$$

式中角频率  $\omega_G > \omega_D$ .

还可以通过两个频率电场的道间变化量定义频散率:

$$D_E(\omega_D, \frac{r_{i+1} + r_i}{2}) = 100 \times [E(\omega_D, r_{i+1}) - E(\omega_D, r_i)],$$
$$D_E(\omega_G, \frac{r_{i+1} + r_i}{2}) = 100 \times [E(\omega_G, r_{i+1}) - E(\omega_G, r_i)],$$
$$P_{FE}(r) = \frac{D_E(\omega_D, r) - D_E(\omega_G, r)}{D_E(\omega_G, r)}, \tag{8}$$

式中  $E(\omega_k, r_i), k = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n$ , 是  $n$  个收发距、 $m$  个不同频率的电场,  $D_E(\omega_k, r_i), k = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n-1$ , 表示第  $k$  个频率电场的道间变化量. 计算中取发射频率范围的任意两个频率,  $\omega_G > \omega_D$ , 以使异常反映最明显为宜.

(2) 对式(7)计算的频散率求道间变化量

$$DP_{FE}(\frac{r_{i+1} + r_i}{2}) = P_{FE}(r_{i+1}) - P_{FE}(r_i). \tag{9}$$

(3) 相对相位<sup>[16]</sup>

$$p_{ha}(r) = \frac{k\varphi(\omega, r) - \varphi(k\omega, r)}{k - 1}. \tag{10}$$

(4) 相对相位道间变化量

$$Dp_{ha}(r) = 100 \times [p_{ha}(r_{i+1}) - p_{ha}(r_i)]. \tag{11}$$

以上定义中, 道间变化量指的是相邻两个接收器间各计算物理量的增大或减小的数量. 一般用大极距的物理量减去小极距的物理量.

下面给出两个算例, 进一步说明以上定义的几个参数对海底高阻层的反映能力.

模型一: 海水有限深, 均匀海底模型, 取海水电导率 3.2 S/m, 海水深 1000 m, 均匀海底电阻率为  $2 \Omega \cdot m$ ;

模型二: 海水有限深, 三层海底模型, 取海水电导率 3.2 S/m, 海水深 1000 m, 第一层电阻率为  $2 \Omega \cdot m$ , 厚度 800 m; 第二层为高阻夹层, 电阻率取  $200 \Omega \cdot m$ , 层厚取 50 m; 第三层为均匀海底, 电阻率为  $2 \Omega \cdot m$

计算结果如图 7 和图 8 所示. 图 7 是模型一为均匀海底的计算, 用低频 1/16 Hz 和 1 Hz 这两个频率的不同收发距的电场幅度和相位分别计算频散率及其随收发距的变化和相对相位及其道间变化量随收发距的变化. 图 7a 是由式(8)计算的频散率, 图 7b 是由式(7)计算的频散率, 图 7c 是由式(9)计算的频散率道间变化量随收发距的变化; 图 7d 是由式(11)计算的相对相位道间变化量随收发距的变化, 计算频率是 1/2 Hz 和 1 Hz. 从这四个变化曲线可以看出, 对于海底均匀, 各参数随收发距单调变

化. 图 7a 和图 7d 在收发距 1000 米左右出现的小波峰是由于海水有限深度引起的.

图 8 是模型二为海洋三层海底的计算, 用低频 1/16 Hz 和高频 8 Hz 这两个频率的不同收发距的电场幅度和相位分别计算频散率及其随收发距的变化和相对相位及其道间变化量随收发距的变化. 图 8a 是由式(8) 计算的频散率, 图 8b 是由式(7) 计算的频散率, 图 8c 是由式(9) 计算的频散率道间变化量随收发距的变化, 图 8d 是由式(11) 计算的相对相位道间变化量随收发距的变化, 计算频率是 4 Hz 和 8 Hz. 从这四个变化曲线可以看出, 对于均匀海底中有高阻夹层, 各参数随收发距均有明显的反映. 图 10a 在收发距  $r = 3250\text{ m}$  处有一个尖锐峰值, 这个

收发距是高阻层埋深  $d_1 = 800\text{ m}$  的 4.0 倍. 在图 10b 中, 在  $r = 3000\text{ m}$  处出现峰值, 这个收发距是高阻层埋深  $d_1 = 800\text{ m}$  的 3.75 倍. 在图 10c 中, 在  $r = 2750\text{ m}$  处出现峰值, 这个收发距是高阻层埋深  $d_1 = 800\text{ m}$  的 3.44 倍; 图 8d 中, 在  $r = 2850\text{ m}$  处相对相位道间变化量先负后正的波动, 这个收发距是高阻层埋深  $d_1 = 800\text{ m}$  的 3.56 倍. 可见, 高阻夹层能够引起频散率及其道间变化率和相对相位道间变化率的明显反映. 宽频带多偏移距低频电磁测深在适当的收发距能够探测在海底有一定埋深的高阻体或高阻、高极化体. 通过特征点对应的收发距可大致估算高阻层的埋深, 约是高阻层埋深的 3.1 ~ 4.0 倍.

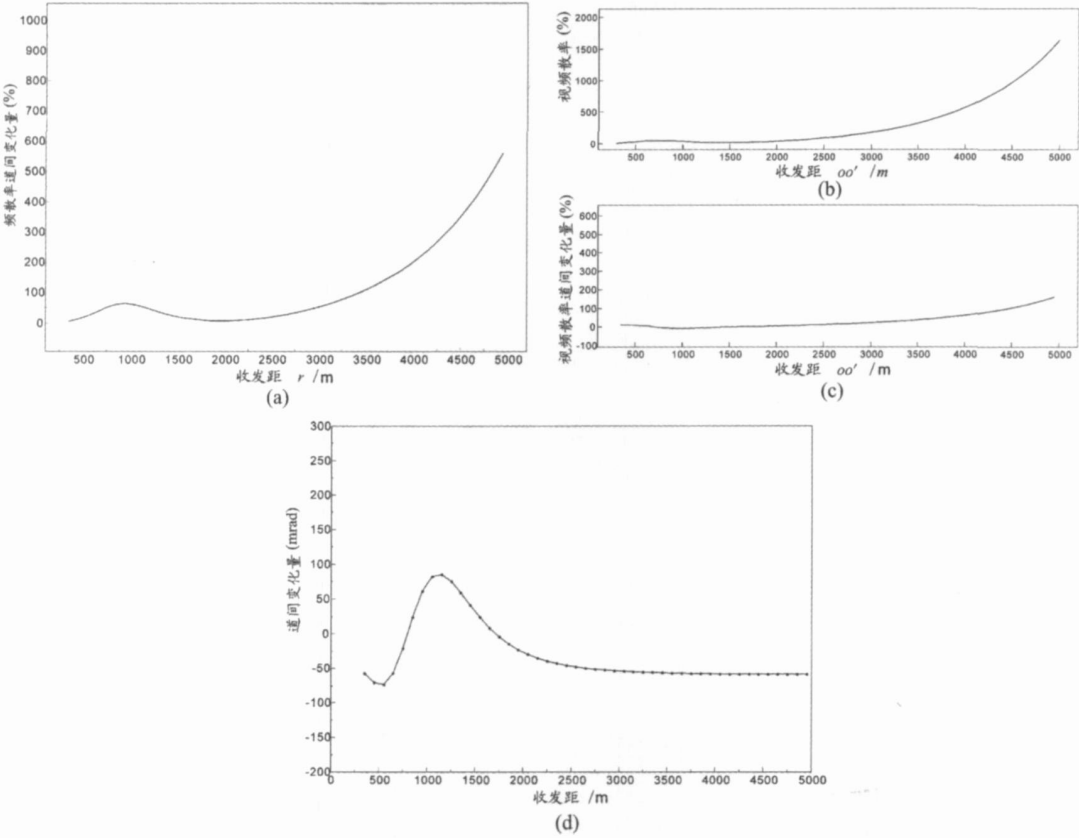


图 7 模型一的频散率和相位道间变化量

由式(8) 计算的频散率(a), 由式(7) 计算的频散率(b),  
由式(9) 计算频散率的道间变化量(c), 由式(11) 计算的相对相位道变化量(d).

Fig. 7 Differentiation of the perccat frequency effect and the relative phase with offset from the first model

- (a) Percent frequency effect computed by equation (8);
- (b) percent frequency effect computed with equation (7);
- (c) differentiation of percent frequency effect with offset by equation (9);
- (d) variation of relative phase with offset by equation (11) , computed by first model

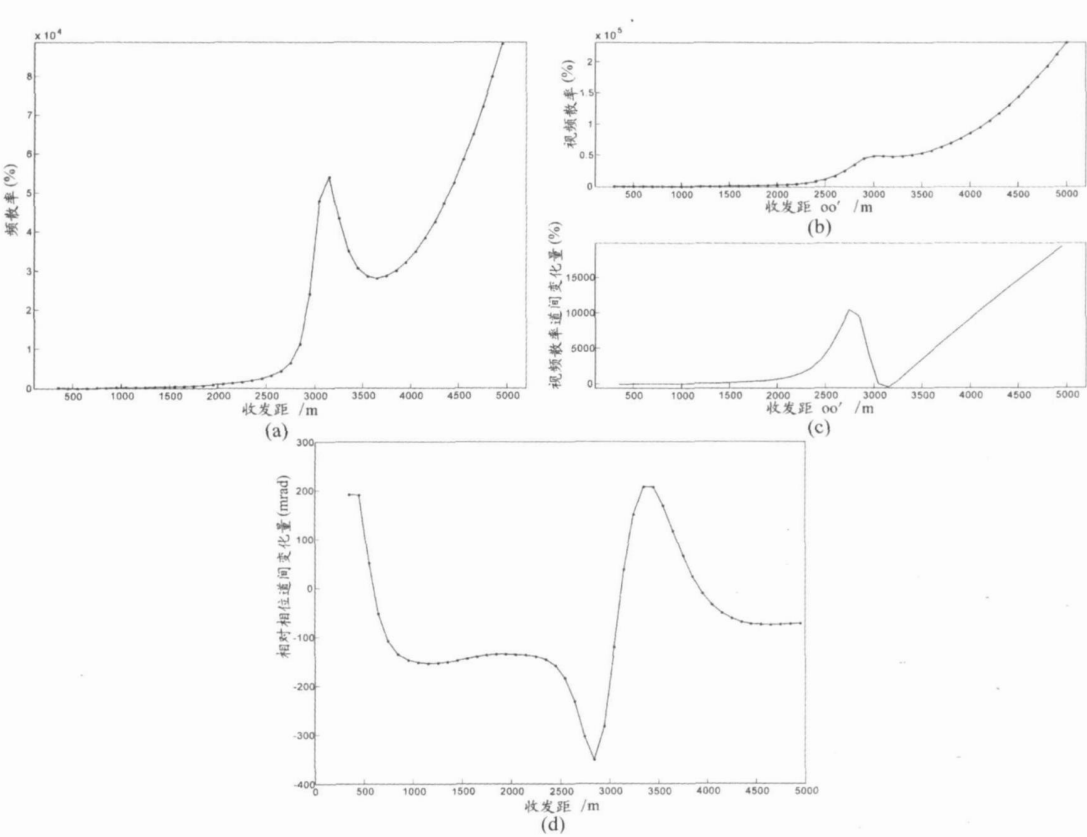


图 8 模型二的频散率和相位道间变化量

由式(8)计算的频散率(a); 由式(7)计算的频散率(b);  
由式(9)计算频散率的道间变化量(c); 由式(11)计算的相对相位道变化量(d)

Fig. 8 Differentiation of the percent frequency effect and the relative phase with offset from the second model

(a) Percent frequency effect computed by equation (8); (b) percent frequency effect computed by equation (7);  
(c) differentiation of percent frequency effect with offset by equation (9);  
(d) variation of relative phase with offset by equation (11) , computed by second model

在海洋做海底可控源电磁法时, 频率范围一般为 0.05 Hz~ 10 Hz, 由式(7)和式(8)计算频散率时, 选择频率范围的最高频率和最低频率, 如高频是 8Hz, 低频是 1/16 Hz, 绘制频散率随收发距的变化曲线, 如果有高阻油气藏存在, 则在某个收发距频散率会有极大值, 利用这个极大值对应的极距可以估计高阻层的埋深, 这个极距与高阻层埋深的比值在 3.1~ 4.0 之间.

在计算相对相位时, 选择高频的两个频率, 如 8 Hz和 4 Hz, 按式(10)计算相对相位, 并按式(11)计算相对相位的道间变化量, 绘制相对相位道间变化量随收发距的变化曲线. 如果有高阻油气藏存在, 则在某个收发距相对相位的道间变化量会出现先负后正的振荡变化, 利用负的极小值对应的极距可以估计高阻层的埋深, 这个极距与高阻层埋深的比值在 3.1~ 3.8 之间.

以上这些参数不管有无激发极化效应, 均能反映高阻或低阻层的存在, 当发生激发极化效应时, 异常幅度会更大、更明显.

3 结 论

本文提出的伪随机海洋电磁法, 采用宽频带多频信号, 多偏移距同时测量, 可以相关辨识海底地电系统的频率特性及冲激响应, 进而多参数辨识海底地层中的高阻油气薄层. 在时间域, 瞬变冲激时刻可以直接指示海底地层电导率的变化, 瞬变冲激时刻的道间变化量对海底高阻薄层的反映更灵敏, 由于电磁能量在高阻层中扩散的快, 因而在适当的收发距瞬变冲激时刻会提前到达, 瞬变冲激时刻的道间变化量会出现负值. 在频率域, 由多频电场响应计算的频散率, 频散率的道间变化量以及相对相位道间变化量可以有效提高对高阻薄层的辨识, 完成一个

剖面的多次测量后, 还可利用这些参数进行断面成像。不仅工作效率高, 而且多参数辨识, 可大大提高勘探准确率。

## 参 考 文 献 (References):

- [1] Wright D, Ziolkowski A, Hobbs B. Hydrocarbon detection and monitoring with a multicomponent transient electromagnetic (MTEM) survey[J]. The leading edge, 2002, 852 ~ 864.
- [2] Weitemeyer K A, Constable S C, Key K W, Behrens J P. First results from a marine controlled source electromagnetic survey to detect gas hydrates offshore Oregon[J]. Geophys. Res. Lett., 2006.
- [3] Edwards N. marine controlled source electromagnetics: principles, methodologies, future commercial applications[J]. Surveys in Geophysics, 2005, 26: 675~ 700
- [4] Edwards R N. On the resource evaluation of marine gas hydrate deposits using seafloor transient electric dipole-dipole methods[J]. Geophysics, 1997, 62(1): 63~ 74.
- [5] 杨建文, Edwards R N. 用于海底电导率填图的可控源时域电磁法[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(4): 705~ 713.  
Yang J W, Edwards R N. Controlled source time domain electromagnetic methods for sea floor conductivity mapping[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998, 8(4): 705~ 713.
- [6] Evans R L. Using CSEM techniques to map the shallow section of seafloor: From the coastline to the edges of the continental slope[J]. Geophysics, 2007, 72(2): 105~ 116.
- [7] Karen W, Steven C, Kerry K. Marine EM techniques for gas hydrate detection and hazard mitigation[M]. The leading edge, 2006.
- [8] Anton Z, Bruce A H, David W. Multitransient electromagnetic demonstration survey in France[J]. Geophysics, 2007, 72(4): 197~ 209.
- [9] Lucy M, David A, James T. Controlled source electromagnetic imaging on the Nuggets-1 reservoir. The leading edge, 2006.
- [10] Eidesmo T, Ellingsrud S, Macgregor L M, *et al.* Remote detection of hydrocarbon filled layers using marine controlled source electromagnetic sounding[M]. EAGE 64th Conference & Exhibition Florence, Italy, 2002.
- [11] Um E S, Alumbaugh D L. On the physics of the marine controlled source electromagnetic method[J]. Geophysics, 2007, 72(2): 13~ 26.
- [12] Constable S, Srnka L J. An introduction to marine controlled source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration[J]. Geophysics, 2007, 72(2): 3~ 12.
- [13] Wright D, Hobbs B, Ziolkowski A. MTEM demonstration survey in France: 75th Annual International Meeting[M]. SEG, Expanded Abstract EM 3. 6, 2005.
- [14] 赵邦六, 何展翔, 文百红. 非地震直接油气检测技术及其勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2005, 6: 29~ 37.  
Zhao B L, He Z X, Wen B H. Non seismic technique for direct oil-gas detection and its exploration practice[J]. China Petroleum Exploration. 2005, 6: 29~ 37.
- [15] 刘影, 史珂. 天然气水合物勘探技术综述[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(6): 984~ 992.  
Liu Y, Shi G. A review of the exploration of gas hydrate[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2004, 40(6): 984~ 992.
- [16] 马在田, 宋海斌, 孙建国. 海洋天然气水合物的地球物理探测高新技术[J]. 地球物理学进展, 2000, 15(3): 1~ 6.  
Ma Z T, Song H B, Sun J G. geophysical prospecting high technologies of marine gas hydrates[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2000, 15(3): 1~ 6.
- [17] 黄俊革, 阮百尧, 王家林. 水下激发极化测深异常特征研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1851~ 1857.  
Huang J G, Ruan B Y, Wang J L. A study on anomaly features detected by subaqueous induced polarization sounding[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(6): 1851~ 1857.
- [18] 陈儒军. 伪随机多频电磁法观测系统研究[D]. 长沙: 中南大学, 2003.  
Chen R J. The Study on Pseudorandom Multifrequency Electromagnetic Prospecting System. Ph. D thesis, ChangSha, Central South University, 2003.
- [19] 李白南. 伪随机信号及相关辨识[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [20] Li B N. Pseudorandom signal and correlation identification[M]. Beijing: Science Publishing House, 1987.
- [21] 赵璧如, 赵健, 等. PS100 型 IP 到端可控源高精度大地电测仪系统—CDMA 技术首次在地电阻率测量中的应用[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 675 ~ 682.  
Zhao B R, Zhao J, *et al.* The PS100 High Precision Earth Electricity Instrument System (IP to IP) with Controllable Source Application of CDMA Technology to the Measurement of Earth resistivity for the First Time. Progress in Geophysics, 2006, 21(2): 675~ 682.
- [22] 汤井田, 李飞, 罗维斌. 基于逆重复 m 序列的精细探测电法发送机设计[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3): 994~ 1000.  
Li F, Luo W B, Tang J T. Electrical fine exploration transmitter design based on invert repeated m sequence. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(2): 994~ 1000.