

# 海洋可控源电磁与地震一维联合储层参数反演

徐凯军\* 杜润林 刘展

(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580)

徐凯军,杜润林,刘展. 海洋可控源电磁与地震一维联合储层参数反演. 石油地球物理勘探, 2016, 51(1): 197-203.

**摘要** 海洋可控源电磁法能识别高阻油气藏,可大幅提高钻井成功率。以 Archie 公式和 Gaaamann 公式为基础,建立油气储层的岩石物理关系,并将其引入目标函数,采用模拟退火结合粒子群算法的优化反演方法进行一维海洋可控源电磁和地震数据联合反演,直接得到储层孔隙度和饱和度参数。数值模拟反演结果表明,该算法不依赖初始值,反演效果好。

**关键词** 储层参数 联合反演 模拟退火 粒子群

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2016.01.025

## 1 引言

在海洋油气勘探中,利用地震数据可以获得精确的地质构造信息并预测储层孔隙度,但却很难判断构造中流体的性质,而海洋可控源电磁法(marine controlled source electromagnetic-MCSEM)可以识别高阻油气藏,大大提高钻井成功率,成为与地震勘探互补的海洋油气勘探技术<sup>[1,2]</sup>。近年来,国内外 MCSEM 正、反演研究得到了较大的发展<sup>[3-7]</sup>。尤其在反演方面,国内外学者作了大量研究,包括一维反演<sup>[8-10]</sup>、二维反演<sup>[11,12]</sup>、三维反演<sup>[13-15]</sup>等。在实际的 MCSEM 勘探区都会进行地震勘探,因此进行地震和 MCSEM 联合反演将会提高反演精度,是当前研究的重点。目前有两种主要的 CSEM 和地震联合反演方法,一是通过岩石物理模型,得到电阻率、横波速度、纵波速度以及密度与孔隙度和饱和度的关系,在反演中直接得到孔隙度和饱和度,如一维地震叠前 AVA 和 CSEM 联合反演研究<sup>[16-20]</sup>,结果表明联合反演要比单一方法得到的结果好,但当大角度时叠前 AVA 反演不准,特别是横波速度和密度。Gao 等<sup>[21-23]</sup>提出了 CSEM 和地震全波形(FWI)联合岩石物理二维反演方法。结果表明,只要能给出较准确的岩石物理模型,就可以得到可信度很高的

孔隙度和含水饱和度,而且通过全波反演估计出的弹性参数更加精确,缺点是反演分辨率低、强非线性、运算量大。二是 Gallorda 等<sup>[24]</sup>提出的交叉梯度法,不要求联合参数有显式的耦合关系,在目标区利用电阻率和速度的结构相似性进行联合反演,如直流电阻率和地震二维联合反演<sup>[24,25]</sup>、大地电磁和地震二维联合反演<sup>[26]</sup>等,当物性参数没有明显的方向变化时,该方法反演效果不佳。只要能给出较准确的岩石物理模型,就可以得到可信度很高的反演结果,通过岩石物理实验和模拟及井资料一般可以得到可靠的岩石物理关系,因此目前国外关于海洋电磁和地震联合反演研究多以岩石物理联合反演为主,而国内研究刚刚起步,还未见相关成果。一维海洋电磁和地震联合反演仍是重要解释手段,本文以 Archie 公式和 Gaaamann 公式为基础,建立油气储层的岩石物理关系,将其引入目标函数,采用模拟退火结合粒子群算法的优化反演方法,避免计算雅可比矩阵,实现一维海洋可控源电磁和地震数据联合反演,在反演中直接得到孔隙度和饱和度。

## 2 储层岩石物理关系建立

通过 Archie 公式建立电导率  $\sigma$  和孔隙度  $\phi$  以及含水饱和度  $S_w$  之间的联系<sup>[22,23]</sup>

\* 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号中国石油大学地学院地球物理系,266580。Email: xkj79@163.com

本文于 2014 年 8 月 14 日收到,最终修改稿于 2015 年 12 月 16 日收到。

本研究受国家高新技术研究发展“863”计划项目(2012AA09A20107)和国家青年自然科学基金项目(41304094)联合资助。

$$\sigma = \frac{\sigma_w \phi^m S_w^n}{a} \quad (1)$$

式中:  $a$  是岩性系数;  $m$  是孔隙度指数;  $n$  是饱和度指数;  $\sigma_w$  为地层水电导率。需要指出的是 Archie 公式是从干净的砂岩中推导的, 现在已经发展了适用于多种岩性的公式, 在实际资料反演中, 将根据实际情况选择合适的公式。

通过 Gassmann 公式建立纵波速度  $v_p$ 、横波速度  $v_s$ 、密度  $\rho$  与含气饱和度  $S_g$ 、含水饱和度  $S_w$ 、含油饱和度  $S_o$  和孔隙度  $\phi$  之间的联系<sup>[22,23]</sup>

$$\begin{cases} v_p = \sqrt{\frac{K_{\text{sat}} + \frac{4}{3}\mu_{\text{sat}}}{\rho_{\text{sat}}}} \\ v_s = \sqrt{\frac{\mu_{\text{sat}}}{\rho_{\text{sat}}}} \end{cases} \quad (2)$$

式中

$$\begin{cases} K_{\text{sat}} = (1 - \beta)K_{\text{ma}} + \beta^2 M \\ \mu_{\text{sat}} = (1 - \beta)\mu_{\text{ma}} \end{cases} \quad (3)$$

$$M = \left[ \frac{\beta - \phi}{K_{\text{ma}}} + \phi \left( \frac{S_w}{K_w} + \frac{S_o}{K_o} + C_g \frac{S_g}{K_g} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

$$\rho_{\text{sat}} = (1 - \varphi)\rho_{\text{ma}} + \phi(S_w\rho_w + S_o\rho_o + S_g\rho_g) \quad (5)$$

其中  $\beta$  为 Biot 系数, 是孔隙度的函数, 在此采用 Nur<sup>[27]</sup> 提出的临界孔隙度模型

$$\beta = \begin{cases} \phi/\phi_c & 0 \leq \phi \leq \phi_c \\ 1 & \phi > \phi_c \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\phi_c$  是固体变为悬浮体的临界孔隙度;  $K_{\text{sat}}$ 、 $\mu_{\text{sat}}$ 、 $\rho_{\text{sat}}$  分别为含有流体岩石的体积模量、剪切模量和密度模量;  $K_{\text{ma}}$ 、 $\mu_{\text{ma}}$ 、 $\rho_{\text{ma}}$  分别为岩石骨架的体积模量、剪切模量和密度模量;  $K_w$ 、 $K_o$ 、 $K_g$  分别为水、油和气体的体积模量;  $\rho_w$ 、 $\rho_o$ 、 $\rho_g$  分别为水、油和气体的密度;  $C_g$  为气体的校正量, 由 Hoversten 等<sup>[17]</sup> 提出。

准确的岩石物理关系能得到好的反演结果, Gao 等<sup>[22]</sup> 给出了具有代表性的岩石物理参数设置, 借鉴他们的成果, 本文设置 Archie 公式(式(1))中的参数为:  $a = 1$ ,  $m = 1.6$ ,  $n = 2$ ; Gassmann 公式(式(2))中的参数为:  $\phi_c = 0.4$ ,  $K_{\text{ma}} = 32\text{GPa}$ ,  $K_w = 2.81\text{GPa}$ ,  $K_o = 0.75\text{GPa}$ ,  $\rho_{\text{ma}} = 2560\text{kg/m}^3$ ,  $\rho_w = 1050\text{kg/m}^3$ ,  $\rho_o = 750\text{kg/m}^3$ 。在实际资料处理时, 首先要搜集工区测井、地质等资料, 根据岩石物理实验和模拟结合已知资料统计分析确定 Archie 公式和 Gassmann 公式中的系数。

### 3 建立联合反演目标函数

联合反演中建立合适的目标函数将不同物性参数联合起来是非常关键的。为了增强联合反演的稳健性, 避免联合反演过程中某一种数据占据主导地位, 在联合反演过程中采用如下的目标函数

$$\Phi(\mathbf{m}) = \Phi_d^S(\mathbf{m}) + \gamma\Phi_d^{\text{EM}}(\mathbf{m}) \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{\Phi_d^S(\mathbf{m}_0)}{\Phi_d^{\text{EM}}(\mathbf{m}_0)} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{m}$  是模型参数;  $\mathbf{m}_0$  为初始模型参数;  $\Phi_d^S$  是归一化的地震数据;  $\Phi_d^{\text{EM}}$  是归一化的海洋可控源电磁数据。可表示为

$$\begin{aligned} \Phi_d^S(\mathbf{m}) &= \frac{1}{2} \frac{\sum_{k=1}^{N_F^S} \sum_{i,j=1}^{N_S^S, N_R^S} |\omega_{d;i,j,k}^S [d_{i,j,k}^S - s_{i,j,k}^S(\mathbf{m})]|^2}{\sum_{i,j=1}^{N_S^S, N_R^S} |\omega_{d;i,j,k}^S d_{i,j,k}^S|^2} \\ &= \frac{1}{2} \|\mathbf{W}_d^S [\mathbf{d}^S - \mathbf{s}^S(\mathbf{m})]\|^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Phi_d^{\text{EM}}(\mathbf{m}) &= \frac{1}{2} \frac{\sum_{k=1}^{N_F^{\text{EM}}} \sum_{i,j=1}^{N_S^{\text{EM}}, N_R^{\text{EM}}} |\omega_{d;i,j,k}^{\text{EM}} [d_{i,j,k}^{\text{EM}} - s_{i,j,k}^{\text{EM}}(\mathbf{m})]|^2}{\sum_{i,j=1}^{N_S^{\text{EM}}, N_R^{\text{EM}}} |\omega_{d;i,j,k}^{\text{EM}} d_{i,j,k}^{\text{EM}}|^2} \\ &= \frac{1}{2} \|\mathbf{W}_d^{\text{EM}} [\mathbf{d}^{\text{EM}} - \mathbf{s}^{\text{EM}}(\mathbf{m})]\|^2 \end{aligned} \quad (10)$$

其中:  $d_{i,j,k}^S$ 、 $d_{i,j,k}^{\text{EM}}$  分别为频率域地震和电磁实测数据;  $s_{i,j,k}^S$ 、 $s_{i,j,k}^{\text{EM}}$  分别为正演地震和电磁场响应;  $N_F$ 、 $N_S$ 、 $N_R$  分别表示频率、源点和接收点个数;  $\mathbf{W}_d^S$  和  $\mathbf{W}_d^{\text{EM}}$  为加权对角矩阵。

本文采用射线追踪技术实现地震一维层状介质正演。射线追踪技术是一种比较快速的正演方法, 其核心就是对射线路径进行准确计算和描述。通过汉克尔变换方法, 实现海洋电磁一维层状介质正演模拟。

### 4 模拟退火结合粒子群算法的优化反演

粒子群优化算法具有算法简洁、容易实现、不需调整太多参数且不需要梯度信息和早期收敛速度快的特点, 但后期受随机振荡影响, 收敛速度慢, 极易陷于局部极小值, 精度降低, 易发散, 而模拟退火法

则具有全局寻优能力强的特点。因此,采用模拟退火法结合粒子群算法的优化反演,在每个粒子的速度和位置更新过程中加入模拟退火机制,粒子群优化结果作为模拟退火的初始解,模拟退火解又成为粒子群下一次优化的初始种群,自适应调整退火温度。随着温度逐渐下降,粒子逐渐形成低能量基态,收敛至全局最优解<sup>[28-30]</sup>。其反演过程为:

(1) 给定算法参数,初始化粒子群中各粒子的位置  $X$  和速度  $V$  及确定初始温度;

(2) 根据目标函数计算每个粒子的适应值,保存每个粒子的最优值  $p_i$  和粒子群全局最优值  $p_g$ ;

(3) 设  $w$  为惯性系数,  $c_1$  和  $c_2$  是学习因子,  $r_1$  和  $r_2$  是介于  $[0, 1]$  之间的随机数,按下式更新所有粒子的速度和位置,即

$$V_i(k+1) = wV_i(k) + c_1r_1[p_i - X_i(k)] + c_2r_2[p_g - X_i(k)] \quad (11)$$

$$X_i(k+1) = X_i(k) + V_i(k+1) \quad (12)$$

(4) 得到模拟退火的初始模型,通过模型扰动产生新模型,以概率  $P = \exp\{-[\Phi(m') - \Phi(m)]/T\}$  来决定是否接受产生的新模型;

(5) 退温操作,如满足终止条件,输出最优结果,否则跳到第(2)步进行新的迭代,按

$$T = T_0 \exp(-\alpha k^{1/2})$$

进行退温。式中:  $\alpha$  为衰减因子;  $k$  为迭代次数;  $T_0$  为初始温度。

## 5 模型计算分析

### 5.1 三层含气储层模型

考虑到实际应用中地震和海洋电磁联合反演的目的是反演确定的储层信息,因此首先设定一个仅针对地震资料解释的含气储层进行反演的模型,同时使用本文的反演方法和阻尼最小二乘法进行 CSEM 和地震一维联合反演,并分析对比两种方法的特点。

建立如图 1 所示模型,设储层为含气储层,分为三层,每层厚度为 50m,含气饱和度分别为 0.4、0.3、0.5,孔隙度分别为 0.2、0.3、0.4。海洋电磁发射源长为 300m,距海底 50m,发射频率为 0.25、1.0、2.0Hz,接收站为 3 道,道间距为 300m,发射源到第一个接收站距离为 1000m。

首先给出相对合理的初始值,对两种方法进行对比,含气饱和度初值分别为 0.6、0.2、0.6,孔隙度

分别为 0.1、0.2、0.3。用双核 CPU 3.0GHz、内存为 4GB 的计算机进行运算,模拟退火方法所用时间为 37.718s,阻尼最小二乘法所用时间为 9.812s,图 2 为两种方法反演结果。从图中可以看出,两种方法得到的结果都比较好,说明在初始值相对合理的情况下,两种方法都能得到较好的反演结果,但是阻尼最小二乘法反演速度较快。

当含气饱和度初值为 0.2、0.2、0.2,孔隙度初始值为 0.3、0.3、0.3 且与真实值差异比较大时,反演结果如图 3 所示。从图中可以看出在初始值和真实值差异较大时,模拟退火结合粒子群算法的优化反演仍能得到较好的反演结果,不依赖初始模型。但是阻尼最小二乘法反演结果偏差较大,说明阻尼最小二乘法对初始模型依赖性强。

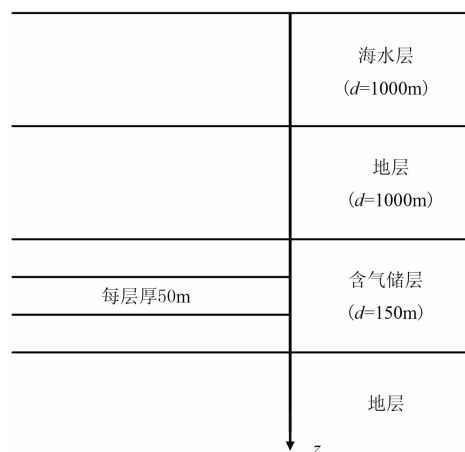


图 1 模型示意图(一)

### 5.2 七层模型

设置一个七层模型(图 4),其中有两个薄层,实际应用中只考虑到海水以下的地层,反演结果也只显示海水层以下地层。去除海水层后各层从上至下含油饱和度分别为 0.15、0.6、0.2、0.5、0.25、0.1,各层孔隙度分别为 0.1、0.4、0.2、0.35、0.15、0.2。海洋电磁发射源长为 300m,距海底 50m,发射频率为 0.1、0.25、1.0、2.0、10 Hz,接收站为 5 道,道间距为 200m,发射源到第一个接收站距离为 1000m。

为了验证反演方法的效果,对海水以下的地层都进行反演,给定各层饱和度和孔隙度的初始值都为 0.3。图 5 是迭代 15 次的反演结果,可以看出在反演迭代 15 次后,反演结果已大致反映出储层参数的相对值,但还没有收敛到真实值。图 6 是迭代 25 次后的反演结果,基本上收敛到真值,得到了较好的

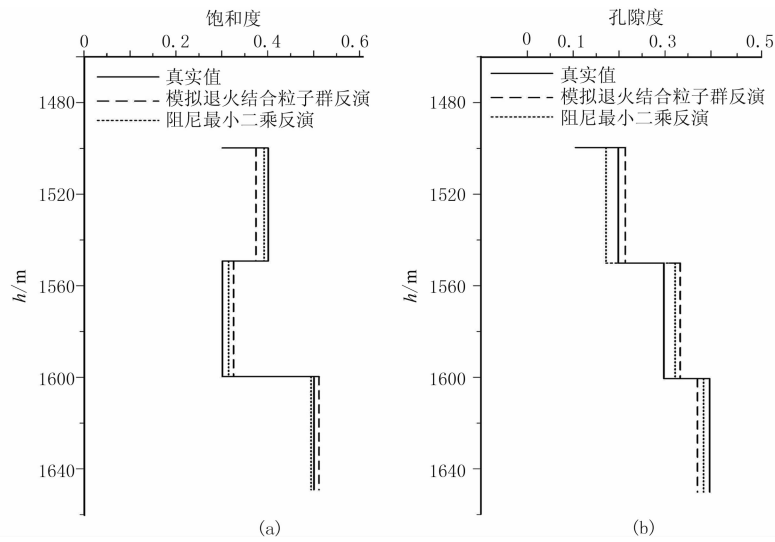


图2 不同方法不同初始储层参数反演结果(一)

(a)含气饱和度; (b)孔隙度

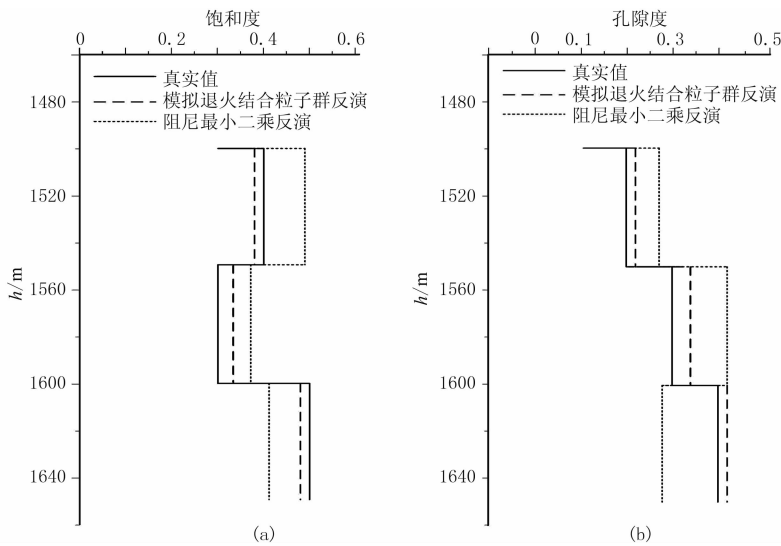


图3 不同方法不同初始储层参数反演结果(二)

(a)含气饱和度; (b)孔隙度

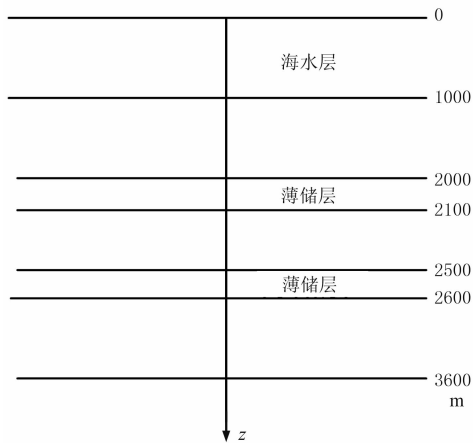


图4 模型示意图(二)

反演结果。可以看出迭代次数越多,反演效果越好。

图7为七层模型反演的数据拟合差曲线,数据拟合差RMS的计算公式为

RMS =

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |[d_i^S - s_i^S(m)]|^2 + \sum_{i=1}^M |[d_i^{EM} - s_i^{EM}(m)]|^2}{N + M}} \quad (13)$$

式中:  $d_i^S$ 、 $d_i^{EM}$  分别为地震和电磁反演数据;  $s_i^S$ 、 $s_i^{EM}$  为正演地震和电磁场响应。从图中可知,反演前期收敛较快,而且后期没有出现振荡,体现了粒子群和模拟退火结合的优势。

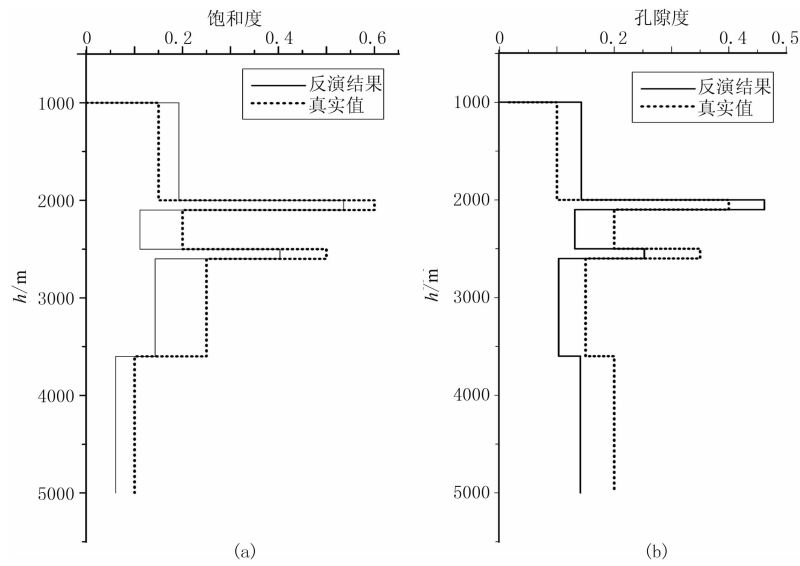


图 5 迭代 15 次储层参数反演结果  
(a) 含油饱和度; (b) 孔隙度

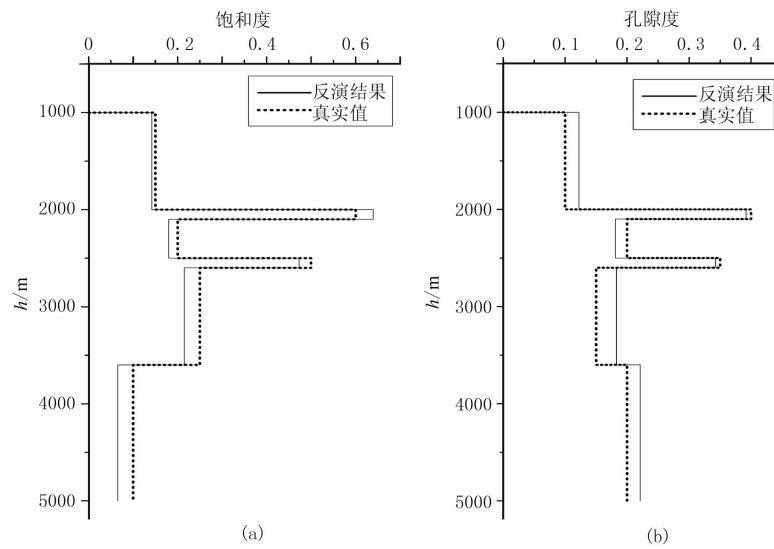


图 6 迭代 25 次储层参数反演结果  
(a) 含油饱和度; (b) 孔隙度

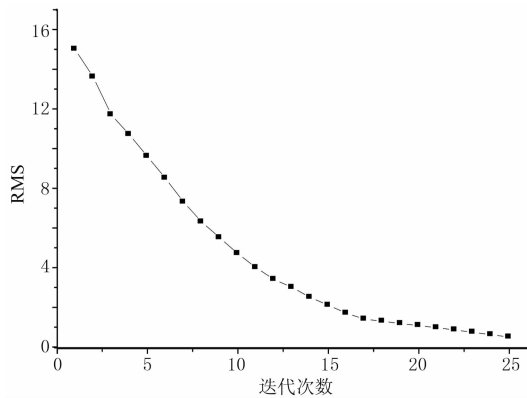


图 7 模型反演的数据拟合 RMS 曲线

## 6 结论

(1) 采用模拟退火结合粒子群算法的优化反演方法实现一维海洋可控源电磁和地震数据联合反演,反演效果较好。

(2) 综合地震和 MCSEM 数据进行联合反演,特别是在地震构造的约束下仅针对储层进行反演,直接得到储层饱和度和孔隙度,提高反演的可靠性。

(3) 模拟退火结合粒子群算法的优化反演不依赖初始模型,虽然比阻尼最小二乘法反演速度慢,但

能得到较为可靠的反演效果。实际应用中一维联合反演计算量小,其反演速度完全满足实际应用,特别是现场资料的初步处理解释。

#### 参 考 文 献

- [1] Hesthammer J, Rocksource A. The performance of CSEM as a de-risking tool in oil and gas exploration. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2010, 29:675-679.
- [2] 何展翔,孙卫彬,孔繁恕等. 海洋电磁法. 石油地球物理勘探, 2006, 41(4):451-457.  
He Zhanxiang, Sun Weibin, Kong Fanshu et al. Marine electromagnetic approach. OGP, 2006, 41(4):451-457.
- [3] 何展翔,余刚. 海洋电磁勘探技术及新进展. 勘探地球物理进展, 2008, 31(1):2-9.  
He Zhanxiang, Yu Gang. Marine EM survey technology and its new advances. PEG, 2008, 31(1):2-9.
- [4] 沈金松,陈小宏. 海洋油气勘探中可控源电磁探测法(CSEM)的发展与启示. 石油地球物理物探, 2009, 44(1):119-127.  
Shen Jinsong, Chen Xiaohong. Development and enlightenment of controlled-source electromagnetic (CSEM) surveying method in marine oil/gas exploration. OGP, 2009, 44(1):119-127.
- [5] 刘颖,李玉国. 层状各向异性介质中任意取向电偶源的海洋电磁响应. 石油地球物理勘探, 2015, 50(4):755-765.  
Liu Ying, Li Yuguo. Marine controlled-source electromagnetic fields of an arbitrary electric dipole over a layered anisotropic medium. OGP, 2015, 50(4):755-765.
- [6] 裴建新,王启,张秀丽. 海洋 CSEM 探测海底天然气水合物的有效异常研究. 石油地球物理勘探, 2015, 50(1):177-183.  
Pei Jianxin, Wang Qi, Zhang Xiuli. Effective anomaly for gas hydrate detection with marine CSEM method. OGP, 2015, 50(1):177-183.
- [7] 冯许魁,王堃鹏,曹辉等. 井海电磁法一维正演模拟. 石油地球物理勘探, 2014, 49(6):1222-1227.  
Feng Xukui, Wang Kunpeng, Cao Hui et al. 1D forward modeling for marine borehole electromagnetic. OGP, 2014, 49(6):1222-1227.
- [8] Flosadottir A, Constable S. Marine controlled source electromagnetic sounding: Modeling and experimental design. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(B3):5507-5517.
- [9] Key K. 1D inversion of multicomponent, multifrequency marine CSEM data: Methodology and synthetic studies for resolving thin resistive layers. Geophysics, 2009, 74(2):9-20.
- [10] 刘颖,李予国,柳建新等. 海洋可控源电磁场的一维反演. 中国有色金属学报, 2013, 23(9):2551-2556.  
Liu ying, Li Yuguo, Liu Jianxin et al. One-dimensional inversion of marine controlled-source electromagnetic fields. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9):2551-2556.
- [11] Unsworth M, Oldenburg D. Subspace inversion of electromagnetic data: Application to mid-ocean-ridge exploration. Geophysical Journal International, 1995, 123(1):161-168.
- [12] MacGregor L, Sinha M. Use of marine controlled source electromagnetic sounding for sub basalt exploration. Geophysical Prospecting, 2000, 48(6):1091-1106.
- [13] Zhdanov M, Yoshioka K. 3D iterative inversion of the marine CSEM data. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2005, 24:526-529.
- [14] 何展翔,王志刚,孟翠贤等. 基于三维模拟的海洋 CSEM 资料处理. 地球物理学报, 2009, 52(8):2165-2173.  
He Zhanxiang, Wang Zhigang, Meng Cuixian et al. Data processing of marine CSEM based on 3D modeling. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(8):2165-2173.
- [15] 佟拓. 海洋人工源频率域电磁法三维共轭梯度反演研究[学位论文]. 北京:中国地质大学, 2012.
- [16] Hoversten G, Gritto R, Washbourne J et al. Pressure and fluid saturation prediction in a multicomponent reservoir using combined seismic and electromagnetic imaging. Geophysics, 2003, 68(5):1580-1591.
- [17] Hoversten G, Cassassuce F, Gasperikova E et al. Direct reservoir parameter estimation using joint inversion of marine seismic AVA and CSEM data. Geophysics, 2006, 71(3):C1-C13.
- [18] Hou Z, Rubin Y, Hoversten M et al. Reservoir parameter identification using minimum relative entropy-based Bayesian inversion of seismic AVA and marine CSEM data. Geophysics, 2006, 71(6):O77-O88.
- [19] Harris P, MacGregor L. Determination of reservoir properties from the integration of CSEM seismic and well-log data. First Break, 2006, 24(11):53-59.
- [20] Chen Jinsong, Hoversten G, Donald V et al. Marine controlled-source electromagnetic methods a Bayesian model for gas saturation estimation using marine seismic AVA and CSEM data. Geophysics, 2007, 72(2):WA85-WA95.
- [21] Gao G, Abubakar A, Habashy T. Inversion of porosity and fluid saturations from joint electromagnetic and elastic full-waveform data. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2011, 30:660-665.
- [22] Gao G, Abubakar A, Habashy T. Joint petrophysical inversion of electromagnetic and full-waveform seismic data. Geophysics, 2012, 77(3):WA3-WA18.
- [23] Abubakar A, Gao G, Habashy T et al. Joint inversion approaches for geophysical electromagnetic and elastic full-waveform data. Inverse Problems, 2012, 28(5):1-19.
- [24] Gallardo L A, Meju M A. Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint 2D inversion of DC resistivity and seismic data. Geophysical Research Letters, 2003, 30(13):1658-1661.
- [25] Gallardo L A, Meju M A. Joint two-dimensional DC resistivity and seismic travel time inversion with cross

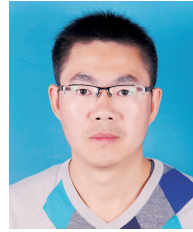
- gradient constraints. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2004, 109(B3): 223-229.
- [26] Gallardo L A, Meju M A. Joint two-dimensional cross-gradient imaging of magnetotelluric and seismic traveltimes for structural and lithological classification. *Geophysical Journal International*, 2007, 169(3):1261-1272.
- [27] Nur A. Critical porosity and the seismic velocities in rocks. *American Geophysical Union*, 1992, 73(1): 43-66.
- [28] 郑申海, 胡小兵, 郑满满等. 改进粒子群和模拟退火混合算法及其应用. *计算机技术与发展*, 2013, 23(7): 26-30.  
Zheng Shenhai, Hu Xiaobing, Zheng Manman et al. An improved hybrid algorithm based on particle swarm optimization and simulated annealing and its application. *Computer Technology and Development*, 2013, 23(7): 26-30.
- [29] 王华秋, 曹长修. 基于模拟退火的并行粒子群优化研究. *控制与决策*, 2005, 20(5): 500-504.

Wang Huaqiu, Cao Changxiu. Parallel particle swarm optimization based on simulated annealing. *Control and Decision*, 2005, 20(5): 500-504.

- [30] 王保丽, 孙瑞莹, 谈晓东. 基于 SA-PSO 优化算法的波阻抗反演. *中国地球物理*, 2013.

(本文编辑:冯杏芝)

## 作者简介



徐凯军 博士, 副教授, 1979 年生; 2002 年本科毕业于吉林大学应用地球物理专业, 获学士学位; 2007 年获吉林大学地球探测与信息技术专业博士学位; 现在中国石油大学(华东)地球科学与技术学院主要从事电磁法勘探正反演、地震联合反演及地球物理综合解释等领域的教研工作。

(上接第 196 页)

- Guo Qian, Pu Renhai. Paleozoic ancient tectonic evolution and hydrocarbon accumulation in Bamai-Tazhong area of Tarim basin. *OGP*, 2011, 46(2): 317-325.
- [11] 张建球, 钱桂华, 郭念发. 澳大利亚大型沉积盆地与油气成藏. 北京:石油工业出版社, 1990, 152-185.
- [12] 黄彦庆, 白国平. 澳大利亚波拿巴盆地油气地质特征及勘探潜力. *石油实验地质*, 2010, 32(3): 238-241.  
Huang Yanqing, Bai Guoping. Petroleum geological characteristics and prospecting potential of Bonaparte basin, Australia. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(3): 238-241.
- [13] 孙林, 陈旭, 董玉文等. 塔里木盆地台盆区三叠系大型辫状河三角洲沉积特征. *石油地球物理勘探*, 2012, 47(4): 642-652.  
Sun Lin, Chen Xu, Dong Yuwen et al. Sedimentary characteristics of the Triassic braided river delta in the Platform of Tarim Basin. *OGP*, 2012, 47(4): 642-652.
- [14] 陈旭, 董玉文, 郝广雷. 塔中地区早二叠世岩浆活动特征及其石油地质意义. *地质科技情报*, 2010, 29(5): 78-83.

Chen Xu, Dong Yuwen, Hao Guanglei. Magmatic activities and their influences on hydrocarbon accumulation in the Early Permian, Central Tarim Basin. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(5): 78-83.

- [15] 宋岩, 赵孟军, 柳少波等. 中国前陆盆地油气富集规律. *地质论评*, 2006, 52(1): 85-92.  
Song Yan, Zhao Mengjun, Liu Shaobo et al. Oil and gas accumulation of foreland basins in China. *Geology Review*, 2006, 52(1): 85-92.

(本文编辑:刘勇)

## 作者简介



李建英 高级工程师, 1969 年生; 1991 年毕业于中国地质大学(武汉)地质学专业, 获理学学士学位; 目前为中国地质大学(北京)矿产普查与勘探专业在读博士研究生。长期从事地震、地质综合研究及油气勘探管理工作。