

基于模拟退火算法的地震资料谱反演技术

朱卫星^{*①} 张春晓^② 张文博^① 王争浩^① 田召琛^①

(^①中海油田服务股份有限公司,河北廊坊 065201; ^②中石化胜利油田,山东东营 257000)

朱卫星,张春晓,张文博,王争浩,田召琛. 基于模拟退火算法的地震资料谱反演技术. 石油地球物理勘探, 2015, 50(3):495-501,515.

摘要 对于厚度小于地震调谐厚度的薄储层,受地震分辨率极限的限制,从地震资料上无法识别。为此,文中基于模拟退火算法的谱反演技术,采用薄层陷频理论,首先对地震资料进行短时傅里叶变换以求取谱反演的输入数据,再利用模拟退火算法进行反演。该法依赖温度的柯西分布状态产生函数,在高温状态下可进行大范围的搜索,在低温状态下只对当前模型附近进行搜索,改进了退火过程及抽样过程,并在改进过程中增加了记忆功能,提高了模拟退火算法的效率与精度。该方法能够突破 Widess 模型分辨率的极限,拓宽地震频带,清晰刻画微小目标地质体及其内部特征。通过理论模型及实际地震资料的试算,验证了本文方法的可行性。

关键词 谱反演 薄层预测 模拟退火 地震分辨率

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.03.016

1 引言

砂泥岩薄互层井间预测技术是岩性油气藏增储上产的关键技术,由于受地震频带的限制,现有的地震数据分辨率有限,很难识别厚度小于 5m 的薄储层。根据 Widess 准则,当薄层厚度小于 $\lambda/8$ 时(λ 为地震波波长),该薄层不能被识别^[1],但这种薄层很有可能是重要的储层,或是储层中的重要流体单元。在油田勘探开发过程中,如何有效识别薄层的顶、底,具有重要意义^[2~5]。

Widess^[1]认为:当地层厚度大于 λ 时,来自顶、底界面的反射子波在时间域内完全分离,地震记录反映了两个界面的最大可能信息;当地层厚度减薄(厚度小于 λ)时,来自顶、底界面的地震反射子波逐渐产生叠加;当地层厚度 $\leq \lambda/4$ 时,地震记录反映了顶、底界面地震反射子波叠加产生的信息,即实际上不存在单界面(顶或底界面)反射信息,其中地震分辨率的基本极限为 $\lambda/8$ 。若在数据中含有噪声或随着子波传播范围的增大,则 $\lambda/4$ 与 $\lambda/8$ 之间的界限就很模糊,实际上零相位子波的分辨率极限约为 $\lambda/4$ 。Widess^[1]提出的薄层地震反射波叠加、干涉理

论基于 Widess 模型(砂岩顶、底界面反射系数相等、符号相反)。当地下砂岩顶、底界面反射系数存在明显差异时,来自薄层的地震反射特征更复杂。在这种情况下,不仅要考虑薄层而且还要考虑上覆、下伏地层间的阻抗差异造成的地震响应特征^[6~15]。

有人认为^[16~33],在能够同时确定反射系数的情况下,利用稀疏反射系数反演参数可估计岩层物性——谱反演,能够提供与常规反演理论不同的结果。谱反演理论是在假设反射结构已知(如假设实际反射结构由连续反射系数序列所描述)的情况下,在 Widess 准则基础上实现的。任何反射系数序列对都可以分解为偶分量和奇分量,其中偶分量具有相同的数值和符号,奇分量具有相同的数值和相反的符号。前人对此进行了描述^[6~9],揭示了在地层厚度小于 $\lambda/4$ 时地震属性的变化规律,因此根据地震响应识别地层厚度小于 $\lambda/4$ 的薄层是可能的。

基于模拟退火算法的谱反演技术,采用薄层陷频理论,首先对地震资料进行短时傅里叶变换以求取谱反演的输入数据,再利用模拟退火算法进行反演。该法依赖温度的柯西分布状态产生函数,在高温状态下可进行大范围的搜索,在低温状态下只对当前模型附近进行搜索,改进了退火过程及抽样过

* 河北省三河市燕郊镇行宫西大街 3 号中海油田服务股份有限公司, 065201. Email: zhuzwx007@163.com

本文于 2014 年 5 月 13 日收到,最终修改稿于 2015 年 4 月 9 日收到。

程,并在改进过程中增加了记忆功能,提高了模拟退火算法的效率与精度。该法能够突破 Widess 模型分辨率的极限,拓宽地震频带,清晰刻画微小目标地质体及其内部特征。

2 基本原理

谱反演基于薄层陷频理论展开研究,通过频谱反演薄层,结合短时傅里叶变换谱分析用于合成记录和实际资料,可以较好地识别厚度小于调谐厚度的薄层。

2.1 谱反演方法

对地震记录做短时傅里叶变换,然后利用谱分析技术建立目标函数^[6,7]。经过不断地迭代、反演求取反射系数最优解^[4,5],其目标函数为

$$O(t, r_e, r_o, T_d) = \int_{f_L}^{f_H} \left\{ \alpha_e \left\{ \operatorname{Re} \left[\frac{s(t, f)}{w(t, f)} \right] - \int_{-t_w}^{t_w} r_e(t) \cos[\pi f T_d(t)] dt \right\} + \alpha_o \left\{ \operatorname{Im} \left[\frac{s(t, f)}{w(t, f)} \right] - \int_{-t_w}^{t_w} r_o(t) \sin[\pi f T_d(t)] dt \right\} \right\} df \quad (1)$$

式中: $r_e(t)$ 与 $r_o(t)$ 分别为奇、偶脉冲关于时间的函数; t_w 为半个时窗长度; $T_d(t)$ 为层厚度的时间序列; $w(t, f)$ 为地震子波; $s(t, f)$ 为地震记录; f_L 与 f_H 分别为低截频、高截频; α_e 与 α_o 分别为奇、偶脉冲的权函数,二者的比值可以调整噪声与分辨率^[8],即在 α_e/α_o 为高值时,反射率较接近 Widess 模型,分辨率截止值变为 $\lambda/8$ 。

为了避免陷入局部最优,文中选择了模拟退火算法,图 1 总结了谱反演流程。

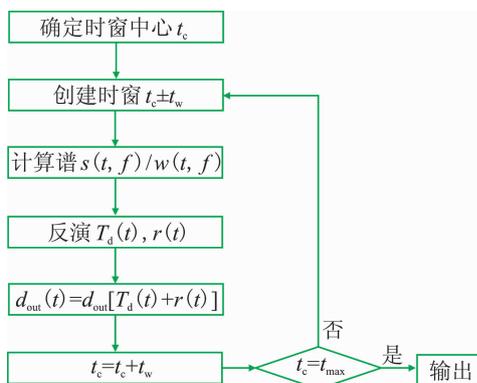


图 1 谱反演流程图

t_{max} 为最大时窗, $d_{out}(t) = d_{out}[T_d(t) + r(t)]$ 代表把变量带入目标函数后的结果输出

2.2 模拟退火的物理意义

在对固体物质进行退火处理时,通常是先给它加温,使其熔化,让其中的粒子可以自由运动,然后随着温度缓慢下降,粒子逐渐形成低能态的晶格。若在凝结点附近的温度下降速率过快,则不能达到这个能量最低态,而是以一种多晶或者非晶的高能量亚稳态结束。因此,该过程的本质是慢速冷却,让粒子有充分的时间失去可动性,以进行重新分布,这是退火的技术定义,可确保粒子达到低能态。

对于组合优化问题来说,也具有类似的过程,即组合优化问题解空间的每一点都代表一个具有不同目标函数的解。所谓优化,就是在解空间寻找函数最小解的过程。若把函数看成能量函数,把控制参数视为温度,解空间作为状态空间,那么模拟退火算法寻找基态的过程就是求目标函数极小值的优化过程。因此,基于 Metropolis 接受准则的最优化过程与物理退火过程存在一定的相似性^[33]。

2.3 模拟退火算法的数学原理

谱反演采用常规的最优化方法很难获得理想的反演结果,容易陷入局部最优,而采用模拟退火算法却可以克服目标函数容易陷入局部极小的限制,使反演获得全局最优解,提高了反演精度和可靠性,但模拟退火算法存在迭代时间长,反演速度慢等问题。为此,文中根据谱反演的特点,研究了依赖于柯西分布的状态产生函数,使退火过程增加了记忆功能,并改进了退火、抽样过程,大大提高了模拟退火速度。

由统计力学知道,物体退火过程的统计性质服从以下正则分布^[20~34]

$$P\{E = E_i\} = \frac{1}{Z(T)} \exp\left(\frac{-E_i}{kT}\right) \quad (2)$$

式中: $\exp\left(\frac{-E_i}{kT}\right)$ 为 Boltzmann 因子,其中 T 为绝对温度, k 为 Boltzmann 常数, E_i 为粒子初始状态 i 的能量; $Z(T)$ 为概率分布的标准因子,即

$$Z(T) = \sum \exp\left(\frac{-E_i}{kT}\right) \quad (3)$$

由式(2)可知,物体处于状态 i 和状态 j 的几率的比值等于相应的 Boltzmann 因子的比值,即

$$r = \exp\left(\frac{E_i - E_j}{kT}\right) \quad (4)$$

其中 $r < 1$ 。用随机数发生器产生一个在 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机数 δ ,若 $r > \delta$,则接受新状态 j ,反之,则舍弃。若新状态 j 可以接受,则以 j 取代 i 成

为当前状态,重复以上新状态的产生过程。在大量迁移(固体状态的变换称为迁移)后,系统趋于能量较低的平衡状态^[32]。

通过对上述物理现象的模拟,可以得到函数优化的 Metropolis 接受准则。设 $L(S, F)$ 为优化中的一个实例, S 表示解空间, $F: S \rightarrow R$ 表示解空间到实数的映射, τ 为模拟退火过程中温度的控制参数。假定 $L(S, F)$ 存在邻域以及相应解的产生机制, $F(i)$ 、 $F(j)$ 分别为对应于解 i 、 j 的目标函数值。由解 i 过渡到解 j 的接受概率可由以下 Metropolis 准则确定

$$P(\tau_k) = P(i \rightarrow j) = \begin{cases} 1 & F(i) \leq F(j) \\ \exp\left[\frac{F(i) - F(j)}{\tau_k}\right] & F(i) > F(j) \end{cases} \quad (5)$$

2.4 改进的模拟退火算法的物理意义及算法流程

模拟退火算法是一种串行优化算法,其执行过程要经历双重循环,即内循环(在当前温度下进行 Markov 链长度搜索)和外循环(利用降温函数进行降温来控制状态更新概率),而每步只随机尝试当前状态邻域中的一个状态,加快了运算速度。

另外,由于模拟退火算法通过概率判断来接受新状态,因此在局部极小解处有机会逃离并最终趋于全局最优,这在理论上已得到严格证明。即要满足初始温度足够高、降温过程极度缓慢,同时保证在每一温度下抽样非常多、最终温度趋于零的条件下,算法才能依概率等于 1 收敛到全局最优解。由于全局收敛条件难以实现,并且概率接受使得当前状态可能比搜索轨迹中的某些轨迹状态要差,往往最终得到近似最优解,甚至可能比中间经历的最坏解差,导致搜索效率较差。为此,文中提出以下研究思路:在算法搜索过程中保留中间最优解,并及时更新,设置双闲值(程序中设置的两个额外变量用于临时存放当前的最优解),在尽量保持最优性的前提下减少计算量,即在各温度下若当前状态连续保持不变,则认为 Metropolis 抽样稳定;若连续退温过程中所得到的最优解均不变,则认为算法收敛。改进的算法由改进的退火过程和改进的抽样过程两部分组成,其流程分别如图 2、图 3 所示。

2.4.1 改进的退火过程

(1) 给定初始温度 τ_0 , 随机产生初始状态 S , 令初始最优解 $S^* = S$, 当前状态为 $S(0) = S, i = p = 0$ (p 为收敛准则, 判断是否最优收敛);

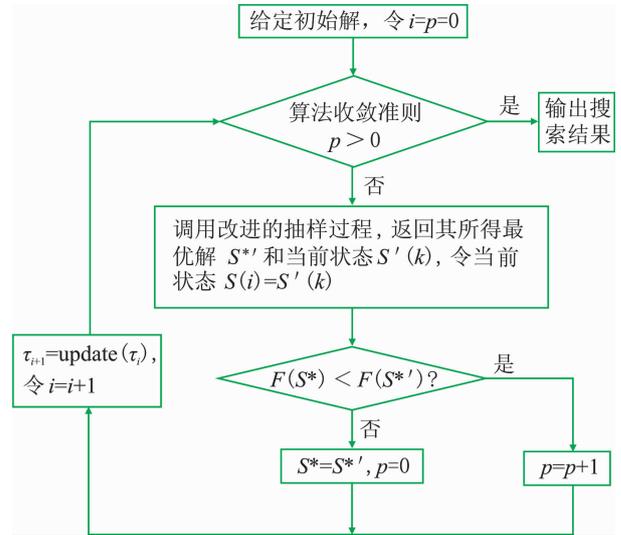


图 2 改进退火过程流程图

$\tau_{i+1} = \text{update}(\tau_i)$ 代表更新温度, 进行下一轮迭代计算

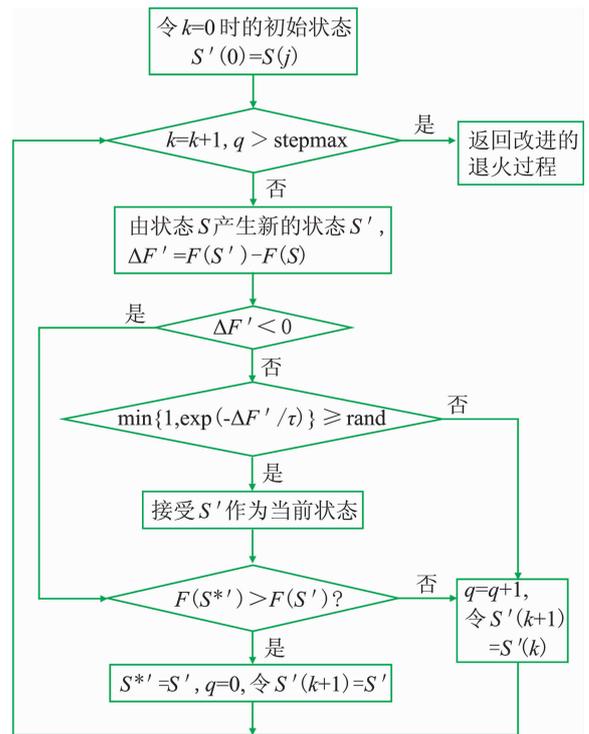


图 3 改进抽样过程流程图

$\min\{1, \exp(-\Delta F' / \tau)\} \geq \text{rand}$ 为概率分布的标准因子, stepmax 代表抽样准则稳定时的最大抽样步数

(2) 令 $\tau = \tau_i$, 以 τ 、 S^* 和 $S(i)$ 调用改进的抽样过程, 返回其所得最优解 $S^{*'}$ 和当前状态 $S'(k)$, 令当前状态 $S(i) = S'(k)$, 并计算对应的 p 值, 设为 PP ;

(3) 若 $F(S^*) < F(S^{*'})$, 则令 $p = p + 1$; 否则令 $S^* = S^{*'}, p = 0$;

(4) 退温, $\tau_{i+1} = \text{update}(\tau_i)$, 令 $i = i + 1$;

(5)若 p 大于步骤(2)的 p 值(PP),则转向步骤(6),否则返回步骤(2);

(6)以最优解 S^* 作为最终解输出,停止算法。

2.4.2 改进的抽样过程

(1)令 $k=0$ 时的初始当前状态为 $S'(0)=S(j)$, 初始最优解 $S^{*'}=S^*$, $q=0$ (q 为抽样稳定准则)。

(2)由状态 S 通过状态产生函数产生新状态 S' , 计算增量 $\Delta F'=F(S')-F(S)$ 。

(3)若 $\Delta F' < 0$ 则接受 S' 作为当前解, 若 $F(S^{*'}) > F(S')$, 则令 $S^{*'}=S'$, $q=0$, 否则令 $q=q+1$; 若 $\Delta F' > 0$, 则以概率 $\exp(-\Delta F'/\tau)$ 接受 S' 作为下一个当前状态, 若 S' 被接受, 则令 $S'(k+1)=S'$, $q=q+1$, 否则令 $S'(k+1)=S'(k)$ 。

(4)令 $k=k+1$, 若 q 大于步骤(1)的 q' , 则转向步骤(5), 否则返回步骤(2)。

(5)将当前最优解 $S^{*'}$ 和当前状态 $S'(k)$ 返回到改进退火过程。

2.5 模拟退火算法实现与应用

谱反演问题归结为基于最优化方法的地震资料参数反演, 该方法利用迭代计算求取目标函数极小时的反演解, 换句话说, 反演问题被归结为求目标函数极值的问题。因此反演过程就是利用改进模拟退火算法对式(1)进行最优化的过程。

对目标函数进行搜索时完全是随机的, 如当温度达到某一值时, 可能已经完全接近全局最优解, 但随着温度的降低, 又接受了恶化解, 使解从全局最优中跳出。改进的模拟退火过程则是使用了记忆功能, 记忆了整个搜索过程中的较新目标值与记忆值, 若新值比记忆值小, 则用新函数值代替记忆值, 并由新模型参数替换记忆参数, 最后得到的记忆参数和记忆目标函数值即为相对整个搜索过程的最优值。图 4 为加入记忆功能前、后的迭代次数—参数值变化曲线, 由图中可见, 当迭代次数达到约 2000 时, 加入记忆功能后的优化参数值较为稳定、收敛, 在以后

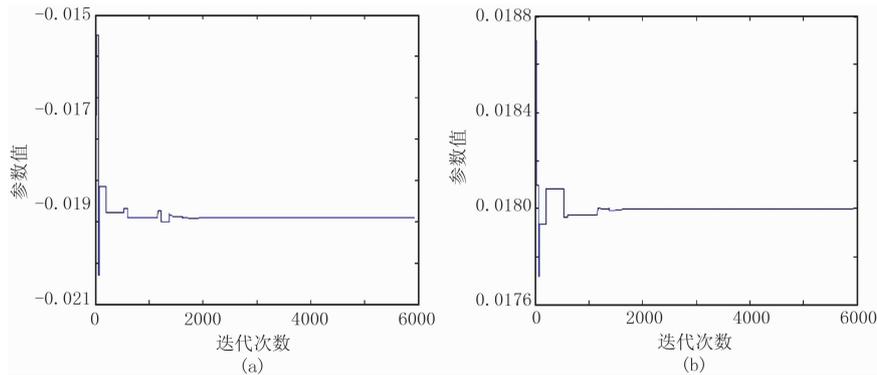


图 4 加入记忆功能前(a)、后(b)的迭代次数—参数值变化曲线

的降温过程中也不会接受恶化解, 保证了最终解的准确性与稳定性(图 4b)。

谱反演处理结果的最终输出为地震反射系数, 其视分辨率要远高于输入地震资料, 结果包括丰富的地层层序模式信息, 可用于精细刻画薄储层形态、识别地层层序边界和变化点、微小断裂解释等。

3 实际地震资料试算

实际地震资料取自中国海上 B 油田 C 区块, 该区块发现滩坝型、三角洲前缘型和滑塌型砂体构成的砂泥薄互层岩性圈闭。岩性组合复杂, 储层横向变化大, 连续性差; 纵向上多期叠置, 泥岩隔层异常发育, 地震同相轴多见复合波, 利用常规方法很难有

效地识别厚度小于 $\lambda/4$ 的有效储层。本文尝试利用谱反演方法预测储层厚度。

3.1 井旁地震道反演

图 5 为该区块过 898 井原始 inline 方向地震剖面及其谱反演处理结果与测井曲线(SP, AC)对比, 由图中可见: ①在原始地震剖面上层之间的界限很不明显(图 5a), 对于厚度小于调谐厚度的薄层, 无法分辨子波的干涉(如图中红色椭圆所标位置, 薄互层呈现复波, 无法分辨); ②谱反演处理结果成功分离复合波(图 5b), 可识别出薄层顶、底面, 较清晰地识别出薄层, 可以大致判断薄层的视厚度。说明谱反演可以在薄层预测中取得一些重要信息。图 6 为过 898 井原始 crossline 方向地震剖面及其谱反演处理结果与测井曲线(SP, AC)对比, 由图中可见,

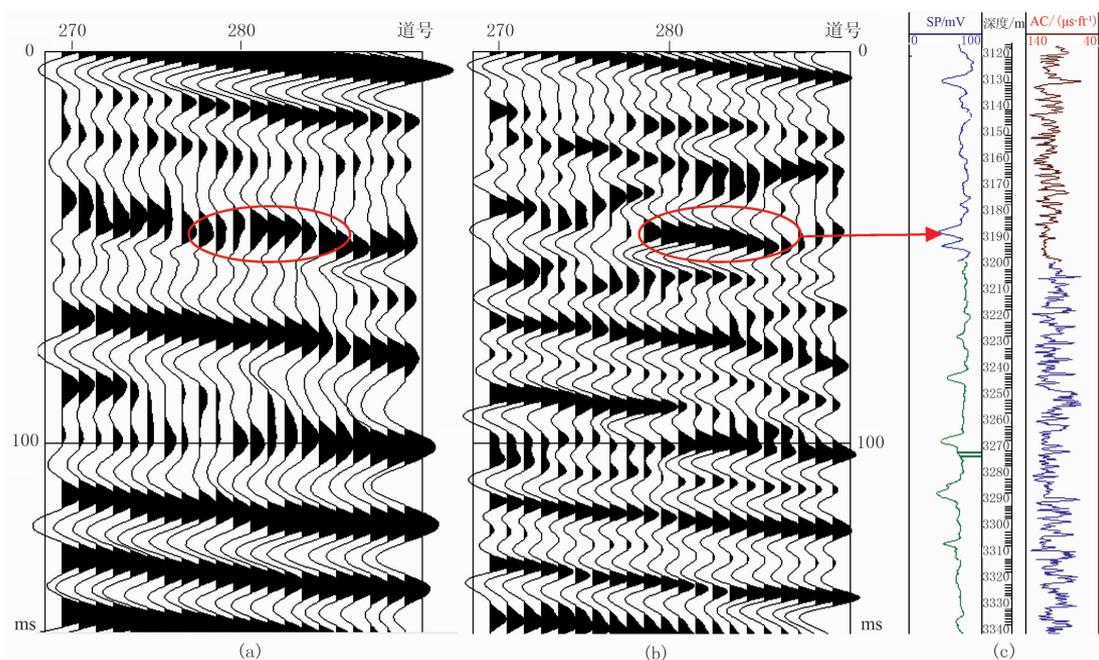


图 5 过 898 井原始地震剖面(inline 方向)(a)及其谱反演处理结果(b)与测井曲线(SP、AC)(c)对比

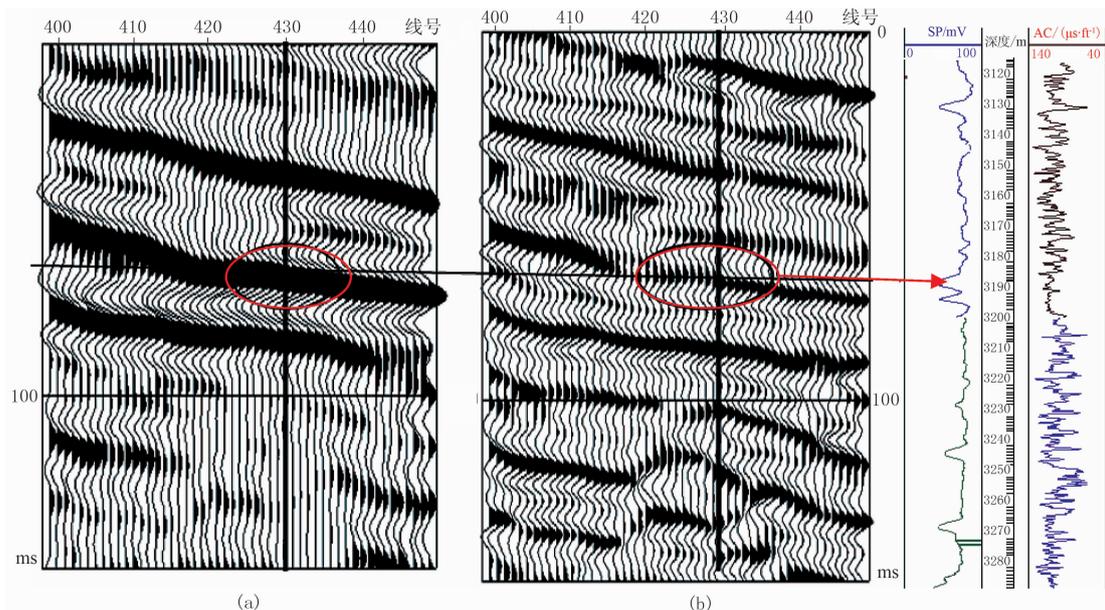


图 6 过 898 井原始地震剖面(crossline 方向)(a)及其谱反演处理结果(b)与测井曲线(SP、AC)(c)对比

谱反演处理结果清晰地刻画了 MD3190m 处的薄互层(图中椭圆处)。

3.2 全区谱反演

在对 C 区块的地震资料进行层位追踪、断层解释、绘制构造图、稀疏脉冲反演等工作的基础上,根据砂体分布图及平均振幅属性,划定了一个有利区带,针对该有利区带开展谱反演研究以获得薄层信息。图 7 为过有利区带的 inline971 原始地震剖面,图 8 为 inline971 传统方法反演剖面,图 9 为基于改

进模拟退火算法的谱反演处理剖面。由图中可见:

①相对于原始地震剖面(图 7)及传统方法反演剖面(图 8),谱反演结果的分辨率明显得到提高,反射波组增加,地质信息更丰富,薄层信息有所突出(图 9);
②划定的有利区带(椭圆区域)在原始地震剖面上表现为波谷反射,在谱反演结果剖面上(图 9)增加了一个波峰相位,在传统方法反演剖面上所揭示的薄层较厚(图 8)。随后的井资料证实,该区块存在薄层砂体,且厚度与谱反演结果(图 9)所揭示的厚度

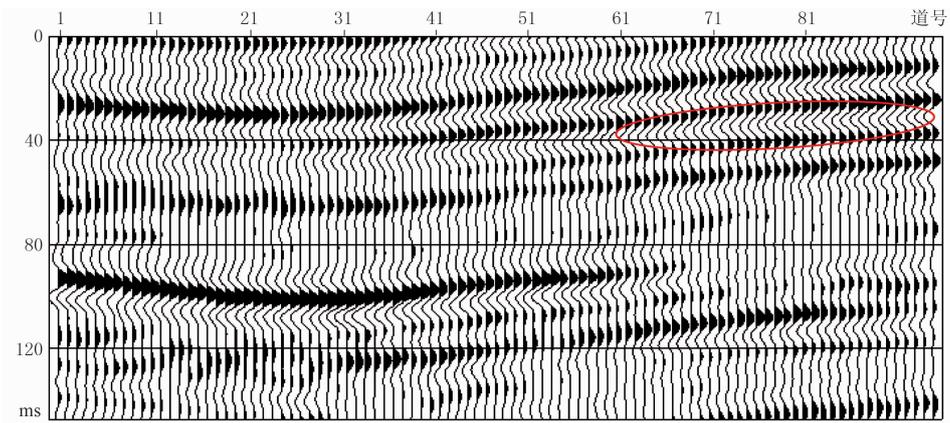


图 7 过有利区带的 inline971 测线原始地震剖面

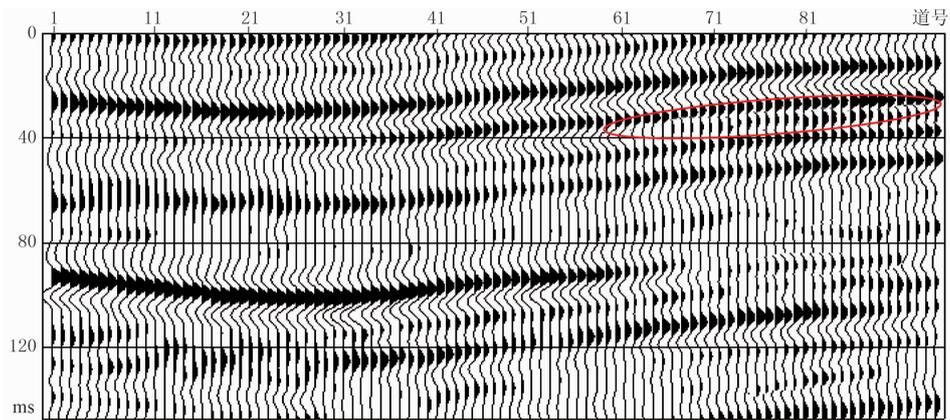


图 8 inline971 测线传统方法反演剖面

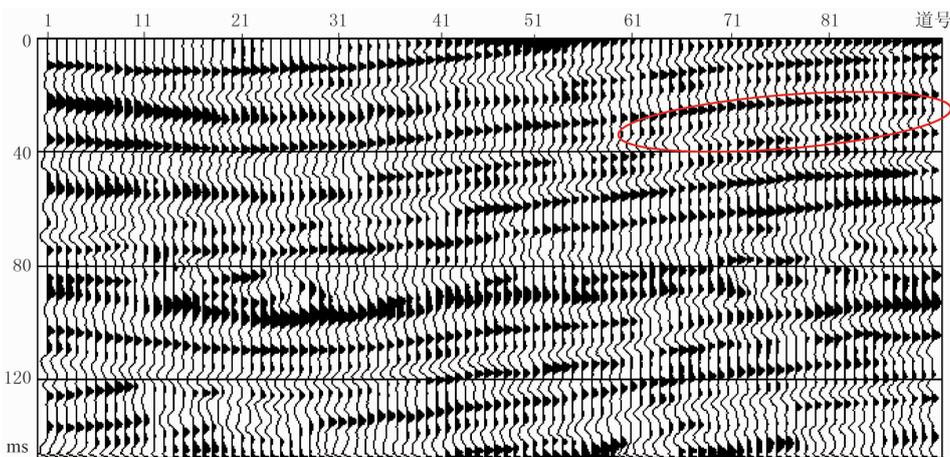


图 9 基于改进模拟退火算法的 inline971 测线谱反演处理剖面

基本吻合,从而进一步证实了本文提出的谱反演方法的合理性。

4 结束语

谱反演是基于薄层陷频理论提出的一种频域反

演方法,反演结果能够反映原始地震数据不能分辨的薄层信息,从而获得薄层的视厚度信息,为储层预测提供依据。基于模拟退火的地震反演算法是一种串行优化算法,本文在此基础上通过改进退火过程及抽样过程,并在退火过程中增加了记忆功能,大大提高了算法运算速度。基于模拟退火算法的谱反演

技术,可以有效地拓宽地震频带,提高地震分辨率,用于薄层、层序边界及小断层等地质目标体的识别,并在实际地震资料应用中得到了有效的验证。

参 考 文 献

- [1] Widess M B. How thin is a thin beds? *Geophysics*, 1973, 38(6):1176-1180.
- [2] 程正兴. 小波分析算法与应用. 陕西西安:西安交通大学出版社,1998,120-129.
- [3] 师永民. 高分辨率砂泥岩薄互层储层综合预测技术. 石油地球物理勘探,2000,35(5):661-668.
Shi Yongmin. High-resolution reservoir integrated predicting technique for thin sand-shale interbedding. *OGP*, 2000, 35(5):661-668.
- [4] 汪恩华,贺振华,李庆忠. 基于薄层的反射系数谱理论与模型正演. 成都理工学院学报,2001,28(1):70-74.
Wang Enhua, He Zhenhua, Li Qingzhong. Reflection spectrum theory and model computation based on thin beds. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2001, 28(1):70-74.
- [5] 徐丽英,徐鸣凤,陈振岩. 利用谱分解技术进行薄储层预测. 石油地球物理勘探,2006,41(3):299-302.
Xu Liying, Xu Mingfeng, Chen Zhenyan. Using spectrum decomposition technique for prediction of thin reservoir. *OGP*, 2006, 41(3):299-302.
- [6] Trido S K. Sand Thickness Estimation Using Spectral Decomposition[M]. Oklahoma: University of Oklahoma, 2004.
- [7] Chung H and Lawton D C. Frequency characteristics of seismic reflections from thin beds. *Canadian Journal of Exploration Geophysicists*, 1995, 31(1):32-37.
- [8] Partyka G A. Spectral Decomposition. *SEG Distinguished Lecture*, 2005, 1826-1831.
- [9] 张玉芬,熊维纲. 石油地震勘探中薄互层的反射系数序列振幅谱特征分析. 地球科学——中国地质大学学报,1994,19(5):685-693.
Zhang Yufen, Xiong Weigang. Characteristic analysis of amplitude spectra of reflection coefficient of thin interbedding in oil prospecting. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 1994, 19(5):685-693.
- [10] Castagna J P. Spectral decomposition and high resolution reflectivity inversion. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2004, 23:1238-1241.
- [11] Castagna J P, Sun S and Siegfried R W. Instantaneous spectral analysis; Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons. *The Leading Edge*, 2003, 22(5):120-127.
- [12] Chopra S, Castagna J P and Portniaguine O. Seismic resolution and thin-bed reflectivity inversion. *Canadian Society of Exploration Geophysicists Recorder*, 2006, 31(4):19-25.
- [13] Charles P. Thin-bed reflectivity inversion. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2006, 25:2057-2061.
- [14] Kallweit R S and Wood L C. The limits of resolution of zero-phase wavelets. *Geophysics*, 1982, 47(3):1035-1046.
- [15] Partyka G A, Gridley J A. Interpretational aspects of spectral decomposition in reservoir characterization. *The Leading Edge*, 1999, 18(4):353-360.
- [16] Portniaguine O and Castagna J P. Inverse spectralde composition. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2004, 23:1786-1789.
- [17] Partyka G A. Spectral inversion. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2005, 24:1638-1641.
- [18] Puryear C I. Modeling and Application of Spectral Inversion for Determination of Layer Properties[M]. University of Houston, 2006, 789-797.
- [19] Puryear C I and Castagna J P. An algorithm for calculation of bed thickness and reflection coefficients from amplitude spectrum. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2006, 25:1767-1770.
- [20] Tirado S. Sand Thickness Estimation Using Spectralde Composition. University of Oklahoma, 2004, 1545-1551.
- [21] 王山山,李青仁,管叶君. 约束模拟退火反演. 石油地球物理勘探,1995,30(1):27-35.
Wang Shanshan, Li Qingren, Guan Yejun. Constrained inversion using simulative annealing. *OGP*, 1995, 30(1):27-35.
- [22] 张宏兵,尚作萍,谭胜章等. 波阻抗反演的快速模拟退火算法. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(4):435-437.
Zhang Hongbing, Shang Zuoping, Tan Shengzhang et al. Fast simulated annealing algorithm for wave impedance inversion. *Journal of Hehai University(Natural Sciences)*, 2005, 33(4):434-437.
- [23] 师学明,王家映. 模拟退火法. 工程地球物理学报,2007,4(3):165-174.
Shi Xueming, Wang Jiaying. Simulated annealing method. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2007, 4(3):165-174.
- [24] 李正文,胡光岷,蒲勇. 地震数据多参数约束反演及应用. 石油地球物理勘探,1994,29(5):581-587.
Li Zhengwen, Hu Guangmin and Pu Yong. Multiparameter constrained inversion of seismic data and the application. *OGP*, 1994, 29(5):581-587.
- [25] 杨旭明,陈均,唐权均. 地震资料分布最优化反演方法. 石油地球物理勘探,1994,29(5):588-600.
Yang Xuming, Chen Jun, Tang Quanjun. Step-optimized inversion of seismic data. *OGP*, 1994, 29(5):588-600.
- [26] 柏冠军,吴汉宁,赵希刚等. 地震资料预测薄层厚度方法研究与应用. 地球物理学进展,2006,21(2):554-558.
Bai Guanjun, Wu Hanning, Zhao Xigang et al. Research on prediction of thin bed thickness using seismic data and its application. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(2):554-558.

一致,以北东东向、北西西向为主要优势方向;叠前地震属性可定量检测裂缝发育程度;预测结果与非零 VSP 测井解释结果吻合。因此文中的分方位角处理技术是可行的。

参 考 文 献

- [1] 刘振峰,曲寿利,孙建国等.地震裂缝预测技术研究进展.石油物探,2012,51(2):191-198.
Liu Zhenfeng, Qu Shouli, Sun Jianguo et al. Progress of seismic fracture characterization technology. GPP, 2012, 51(2):191-198.
- [2] 田立新,周东红,明君等.窄方位角地震资料在裂缝储层预测中的应用.成都理工大学学报,2010,37(5):550-553.
Tian Lixin, Zhou Donghong, Ming Jun et al. Application of narrow-azimuth seismic data to fractured reservoir prediction. Journal of Chengdu University of Technology, 2010, 37(5):550-553.
- [3] Rüger A. Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media. Geophysics, 1998, 63(3):935-947.
- [4] 贺振华,黄德济,文晓涛.裂缝油气藏地球物理预测.四川成都:四川科学技术出版社,2007.
- [5] 贺振华,黄德济.缝洞储层的地震检测和预测.勘探地球物理进展,2003,26(2):79-83.
- [27] 于建国,韩文功,刘力辉.分频反演方法及应用.石油地球物理勘探,2006,41(2):193-197.
Yu Jianguo, Han Wengong, Liu Lihui. Frequency-divided inversion and application. OGP, 2006, 41(2):193-197.
- [28] 王山山,李灿平.快速模拟退火地震反演.地球物理学报,1995,38(增刊1):123-134.
Wang Shanshan, Li Canping. The seismic inversion using the fast simulated annealing algorithm. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(S1):123-134.
- [29] 路鹏飞,杨长春.改进的模拟退火算法及其在叠前储层参数反演中的应用.地球物理学进展,2008,23(1):104-109.
Lu Pengfei, Yang Changchun. Modified simulated annealing algorithm and its application in pre-stack inversion of reservoir parameters. Progress in Geophysics, 2008, 23(1):104-109.
- [30] 牛聪,詹毅,李辉峰.对比地震记录信噪比的几种估算方法.物探化探计算技术,2006,28(1):5-9.
Niu Cong, Zhan Yi, Li Hui Feng. The contrast of several methods for the signal/noise ratio estimation of seismic. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 28(1):5-9.
- [31] 陈传仁,周熙襄.小波谱白化提高地震资料的分辨率.石油地球物理勘探,2000,35(6):703-709.
Chen Chuanren, Zhou Xixiang. Improving resolution

of seismic data using wavelet spectrum whitening. OGP, 2000, 35(6):703-709.

- [6] 苏世龙,王永明,黄志.两种数据规则化地震处理技术应用探讨.勘探地球物理进展,2010,33(3):200-206.
Su Shilong, Wang Yongming, Huang Zhi. Application of two data regularization in seismic data processing. Progress in Exploration Geophysics, 2010, 33(3):200-206.
- [7] 贺锡雷,吴永国,贺振华.速度误差对时间偏移和深度偏移的影响分析.物探化探计算技术,2010,32(5):460-463.
He Xilei, Wu Yongguo, He Zhenhua. Error estimation in time and depth migrations with error velocity. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 32(5):460-463.

(本文编辑:刘勇)

作 者 简 介



苏世龙 高级工程师,1975年生;2003年毕业于石油大学(华东)勘探系油气藏形成与分布专业,获硕士学位;毕业后长期从事地震数据处理和解释工作。

(上接第 501 页)

of seismic data using wavelet spectrum whitening. OGP, 2000, 35(6):703-709.

- [32] 赵淑红,朱光明.用小波变换谱均衡法提高地震资料的分辨率.西安科技大学学报,2007,27(2):255-259.
Zhao Shuhong, Zhu Guangming. Using combined method of wavelet transform and spectrum equalization to improve seismic data resolution. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2007, 27(2):255-259.
- [33] 王永刚.地震资料综合解释方法.山东东营:中国石油大学出版社,2007,132-203.
- [34] 李振春.地震数据处理方法.山东东营:中国石油大学出版社,2004,56-109.
- [27] 于建国,韩文功,刘力辉.分频反演方法及应用.石油地球物理勘探,2006,41(2):193-197.
Yu Jianguo, Han Wengong, Liu Lihui. Frequency-divided inversion and application. OGP, 2006, 41(2):193-197.
- [28] 王山山,李灿平.快速模拟退火地震反演.地球物理学报,1995,38(增刊1):123-134.
Wang Shanshan, Li Canping. The seismic inversion using the fast simulated annealing algorithm. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(S1):123-134.
- [29] 路鹏飞,杨长春.改进的模拟退火算法及其在叠前储层参数反演中的应用.地球物理学进展,2008,23(1):104-109.
Lu Pengfei, Yang Changchun. Modified simulated annealing algorithm and its application in pre-stack inversion of reservoir parameters. Progress in Geophysics, 2008, 23(1):104-109.
- [30] 牛聪,詹毅,李辉峰.对比地震记录信噪比的几种估算方法.物探化探计算技术,2006,28(1):5-9.
Niu Cong, Zhan Yi, Li Hui Feng. The contrast of several methods for the signal/noise ratio estimation of seismic. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 28(1):5-9.
- [31] 陈传仁,周熙襄.小波谱白化提高地震资料的分辨率.石油地球物理勘探,2000,35(6):703-709.
Chen Chuanren, Zhou Xixiang. Improving resolution

(本文编辑:刘勇)

作 者 简 介



朱卫星 地质导向工程师,1982年生;2005年毕业于中国石油大学(华东)物探系,获工学学士学位;2008年毕业于中国石油大学(华东)地球探测与信息技术专业,获硕士学位。长期从事开发地震、地质建模、储层预测等方面的研究;目前在中海油田服务股份有限公司从事开发地震方面的研究工作。