

约束模拟退火反演

王山山* 李青仁 管叶君

(成都地质学院)

(大庆石油管理局物探公司)

摘 要

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

模拟退火算法的最大优点是可以突破寻优过程中局部最优的限制,所以该方法适用于解决地震反演中普遍存在的非凸性目标函数的最优化问题。本文讨论了用模拟退火(SA)法进行地震资料的参数反演以及约束条件对反演过程的控制作用。约束条件包括模型参数取值范围和选择初始模型,加入约束条件提高了模拟退火反演的收敛速度,使反演解更为合理。通过理论模型试算和实际资料试处理,证明该方法精度高、实用性强。

主题词 地震反演 模拟退火算法 约束条件 最优化

ABSTRACT

Wang Shanshan, Li Qingren and Guan Yejun. Constrained inversion using simulative annealing. *OGP*, 1995, 30(1): 27~35

The most important superiority of simulative annealing method is to break through the limitation of local optimization in an optimization process, therefore the method is applicable to the optimization of the non-convex objective function that is widely existent in seismic inversion. The article describes both the seismic parameter inversion using simulative annealing method and the influence of restrictive condition upon inversion process. Restrictive condition includes the range of model parameters and the chosen initial model. Restrictive condition speeds up the convergence of simulative annealing inversion to make the inversion solution more reasonable. Theoretical modeling and real data processing prove the method accurate and practical.

Subject heading: seismic inversion, simulative annealing algorithm, restrictive condition, optimization

引 言

在地震反演研究中,许多方法都是利用迭代计算求取目标函数极小时的反演解。这类方法可归结为求目标函数的极值问题,最终采用最优化方法求解反问题。在以往的大量研究中均采

* Wang Shanshan, Applied Geophysical Department, Chengdu College of Science and Technology, Postcode: 610059
本文于1994年6月27日收到。
本项目由国家自然科学基金会、中国科学院、中国石油天然气总公司、大庆石油管理局联合资助。

用梯度法一类的最优化方法,而在地震反演中目标函数与模型之间的关系往往是高度非线性的,采用常规的最优化方法其迭代的最终结果对初始解依赖性很大,当初始模型与实际模型相差较大时,反演结果往往只能得到局部最优解,导致反演结果不理想^[1]。因此,采用有利于突破局部最优的方法进行反演就成为反演研究中的重要课题。

模拟退火方法是为了分析和模拟统计物理中二维相变问题而提出来的^[2],后来人们又将这种方法进一步发展,特别是 80 年代以来模拟退火方法被用来解决最优化问题^[3],使该方法有了广泛的应用。模拟退火方法能够克服传统最优化方法的缺点,获得全局最优解。Rothman (1985,1986)^{[4],[5]}首先将模拟退火方法用于地球物理问题,Sen 和 Staffa^[6]将该方法应用于地震波形反演。但是,这些方法的退火过程慢、效率低。近年来利用非地震资料对地震反演进行约束的反演方案已成为反演研究的一种新思路,获得了一些有价值的研究成果^{[7]~[9]}。从现有资料来看,这些方法主要着眼于补偿地震资料中缺失的频率成分、拓宽频带、提高分辨率,使反演解更为合理。但是,这些方法通常是靠已知资料形成的约束条件来实现这一目标,而采用的最优化方法多是传统方法,因而并未解决突破局部最优的问题。

本文在讨论了模拟退火算法的基础上,将已知条件转化成为具体的约束,以实现反演过程的控制。所以,在用模拟退火方法解决全局寻优问题的同时,又能合理利用约束条件提高反演的精度和收敛速度。约束主要体现在两个方面:首先是反演中参数取值范围的确定,可参考测井等资料形成这种约束;其次是利用测井和地震解释资料形成合理的初始模型,这是实现约束的重要内容。为了验证方法的效果,进行了理论模型试算,并对试算结果进行了分析。结果表明,该方法用于地震反演是有效的,能适应复杂模型的反演计算。本方法还进行了实际资料的处理。

方 法 原 理

模拟退火算法

定义反演的目标函数为

$$S(m) = kT_0 \log \left[\frac{P(m)}{\rho(m)} \right] \quad m \in \Omega \quad (1)$$

式中; m 为模型参数; Ω 为反演的解空间; $P(m)$ 为模型的后验概率密度函数; $\rho(m)$ 为模型的先验概率密度函数; T_0 为任意非负实数(称为温度); k 为波尔兹曼常数。

由式(1)可知

$$P(m) = \rho(m) \exp \left[-\frac{S(m)}{kT_0} \right] \quad (2)$$

在讨论地球物理问题的模拟退火算法时, kT 已失去原来的物理意义,只作为控制参数。令

$$T = kT_0 \quad (3)$$

则

$$P(m) = \rho(m) \exp \left[-\frac{S(m)}{T} \right] \quad (4)$$

T 参数仍称为温度。当 $\rho(m)$ 为常数 A 时,式(4)变成为

$$P(m) = A \exp \left[-\frac{S(m)}{T} \right] \quad (5)$$

由于

$$\sum_{m \in \Omega} P(m) = 1 \quad (6)$$

则

$$A = 1 / \sum_{m \in \Omega} \exp \left[-\frac{S(m)}{T} \right] \quad (7)$$

令

$$D = \sum_{m \in \Omega} \exp \left[-\frac{S(m)}{T} \right] \quad (8)$$

D 称为分配函数,起归一化作用。

温度参数 T 对后验概率密度函数的峰值有控制作用。采用 SA 进行迭代反演的过程实际上是一个温度逐渐下降的过程,在降温过程中对解空间进行随机搜寻,可以获得目标函数全局极小所对应的最优解。在迭代过程中为了突破局部极小的限制,以一定的概率接受目标函数值增大的模型(称为“坏”模型),即引入一定程度的随机扰动来克服局部极小的约束。下面引入一种接受函数

$$a(\Delta S, T) = \begin{cases} 1 & \Delta S \leq 0 \\ \exp \left(\frac{-\Delta S}{T} \right) & \Delta S > 0 \end{cases} \quad (9)$$

作为确定接受“坏”模型的概率。其中 ΔS 是相邻两次迭代的目标函数增量。该函数取值范围为 $0 \leq a(\Delta S, T) \leq 1$ 。

目标函数

地震正演过程可表示为

$$y = f(m) \quad (10)$$

理论计算与观测数据的误差为

$$e(m) = d - f(m) \quad (11)$$

d 为实际资料,误差 $e(m)$ 是随机的。设 $e(m)$ 符合 Gauss 分布,期望值为零,协方差矩阵为 C_e ,则有如下条件的概率密度函数

$$P(y = d | m) = A_1 \exp \left[-\frac{1}{2} e^T C_e^{-1} e \right] \quad (12)$$

式中: A_1 为非负常数; e^T 为误差 e 的转置。

将式(11)代入式(12),得

$$P(y = d | m) = A_1 \exp \left\{ -\frac{1}{2} [d - f(m)]^T C_e^{-1} [d - f(m)] \right\} \quad (13)$$

利用先验信息形成初始模型 m_0 ,并将其引入到目标函数中,构成对反演的约束。我们采用 Gauss 分布,先验概率密度函数为

$$\rho(m) = A_2 \exp \left[-\frac{1}{2} (m - m_0)^T C_m^{-1} (m - m_0) \right] \quad (14)$$

式中: A_2 为非负常数; m_0 为初始模型; C_m 为协方差矩阵。

根据 Bayes 公式,已知实际资料 d 时, m 的后验概率密度函数为

$$P(m) = P(y = d | m) \rho(m) / P(y) \quad (15)$$

其中 $P(y)$ 与 m 无关,取为常数。由式(13)、(14)得

$$P(m) = A \exp \left\{ -\frac{1}{2} [(d - f(m))^T C_e^{-1} (d - f(m)) + (m + m_0)^T C_m^{-1} (m - m_0)] \right\} \quad (16)$$

其中 A 为非负常数。采用使后验概率密度函数最大化的方法来估计最优解,则目标函数可定义为

$$S(m) = \frac{1}{2} \{ [d - f(m)]^T C_e^{-1} [d - f(m)] + (m + m_0)^T C_m^{-1} (m - m_0) \} \quad (17)$$

由式(17)可知,目标函数 $S(m)$ 的极小化等价于使后验概率密度函数 $P(m)$ 的最大化。因此,求取最佳反演解的问题就成为寻找目标函数极小值的问题。

约束条件

本方法采用的约束条件,包括选择初始模型和确定模型参数取值范围两个方面。根据先验信息获取合理的初始模型 m_0 ,对反演计算的收敛有很大的影响,另外还可通过式(17)中与 m_0 有关的项对反演过程起控制作用。初始模型可通过解释已知资料(地震和非地震资料)来获得。除了初始模型对反演的约束外,限制参数的取值范围也是约束条件的重要方面。设离散化的模型为

$$m = \{m^\alpha\} \quad \alpha \in I_\alpha \quad (18)$$

式中: I_α 是自然数集,即 $I_\alpha = \{1, 2, \dots, N_p\}$; m^α 为模型 m 的第 α 个参数; N_p 为模型的参数总数。确定参数的取值范围就是给出参数的上、下界 $m_{\sup}^\alpha, m_{\inf}^\alpha$, 使

$$m_{\sup}^\alpha \leq m^\alpha \leq m_{\inf}^\alpha \quad \alpha \in I_\alpha \quad (19)$$

满足上述条件的模型在模型空间中构成一个子空间 Ω' , 即

$$\Omega' = \{m | m_{\sup}^\alpha \leq m^\alpha \leq m_{\inf}^\alpha\} \quad (20)$$

形成这种约束条件有利于获得合理的反演结果,并减少了计算量。

模型试算

无噪声资料试算

下面对无噪声资料的模拟退火反演试算结果进行简要分析。利用本方法对水平层状速度模型进行了试算。图 1a 中所示速度模型为该层状模型的中心道,速度在 2300~4100m/s 之间变化,时间采样间隔为 2ms,震源函数为 70Hz 的雷克子波,利用有限差分法求解波动方程实现模拟正演。由图 1 可知,经过 70 次迭代之后误差能量已经在 0.5% 以下,基本上已收敛到理论模型,反演精度较高。图 2 是反演结果的合成记录与输入的理论记录的比较,两者波形相似程度很高,剩余值(即理论记录与合成记录之差)很小。

下面我们分析约束条件对模拟退火反演效果的影响。首先分析参数取值范围对反演效果的影响。图 3a 中除取值范围形成的约束条件不同外,其它条件均与图 1a 相同,图 3a 取值范围较大,属于一种宽松的约束(约束 B),计算量大。由图 3b 可以看出,约束条件放松后收敛速度

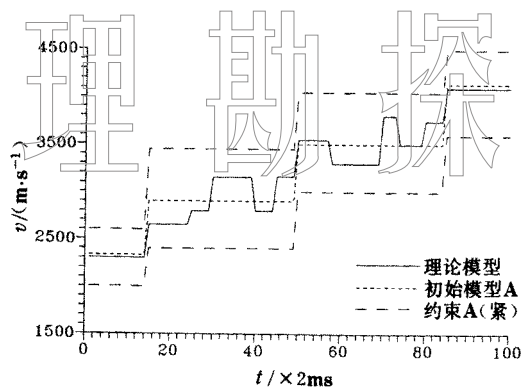


图 1a 理论模型、初始模型 A 和约束 A(紧)

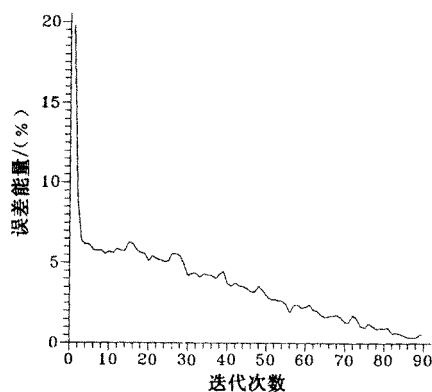


图 1b 误差能量

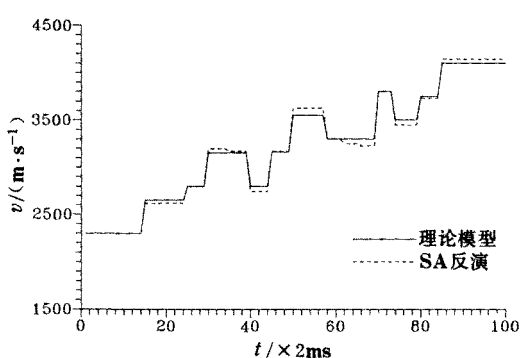


图 1c 反演结果对比
70 次迭代

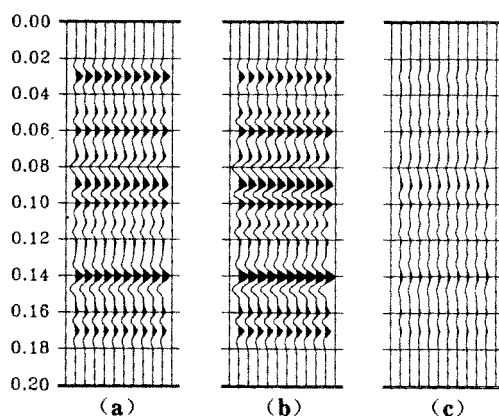


图 2 合成记录与理论记录比较
(a)理论记录;(b)合成记录;(c)剩余值((a)和(b)的差值)

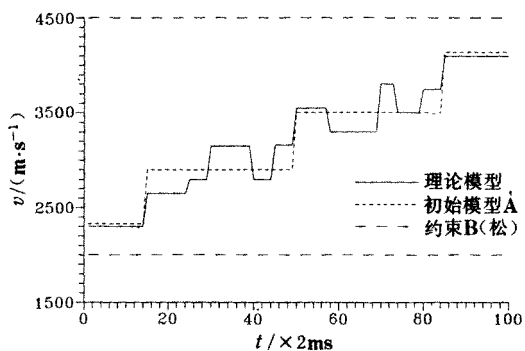


图 3a 理论模型、初始模型 A 和约束 B(松)

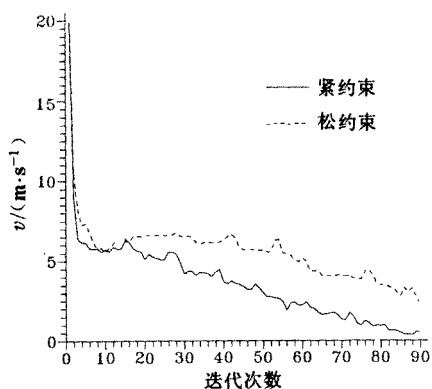


图 3b 误差能量

下降。图 3c 是两种不同约束条件下 70 次迭代计算的反演结果对比,显然约束 B 的效果较差。用约束 B 进行 90 次迭代反演后再与约束 A 的 70 次迭代反演结果对比,两者较为接近(图 3d)。在上述讨论的基础上再分析初始模型对反演结果的影响。图 4a 中初始模型 B 较之图 1a 和图 3a 的初始模型 A 更为简单,从图 4b 中可以看出初始模型 B 对应的误差能量较大,说明

该模型与理论模型的差距更大。选择初始模型 B 使反演过程的收敛速度明显降低(图 4b)。对比两种初始模型 70 次迭代反演的结果,可知初始模型 B 的效果较差(图 4c)。用初始模型 B 进行 90 次迭代反演后再与初始模型 A 的 70 次迭代反演结果相比较,两者较为相近(图 4d)。从以上分析可知,两类约束条件对模拟退火反演过程的主要影响均体现为对反演收敛速度的影响。因此,选择合适的约束条件可以加快反演的收敛速度、减少计算量、提高方法的实用性。

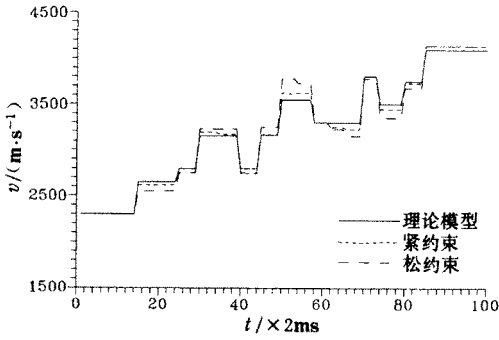


图 3c 反演结果对比
70 次迭代

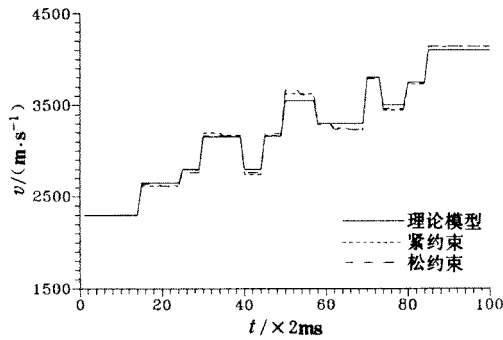


图 3d 反演结果对比
约束 B90 次迭代,约束 A70 次迭代

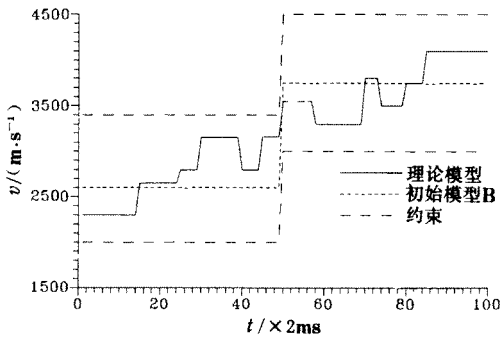


图 4a 理论模型、初始模型 A 和约束

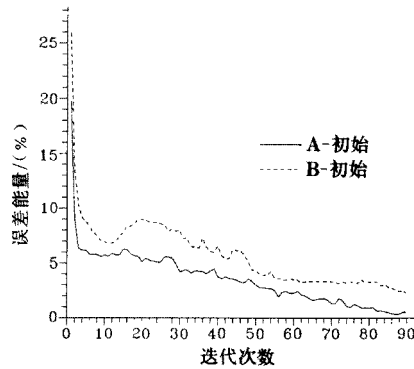


图 4b 误差能量

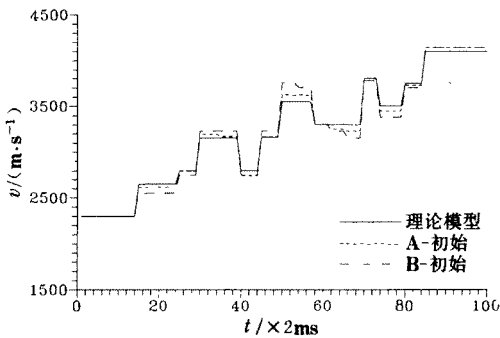


图 4c 反演结果对比
70 次迭代

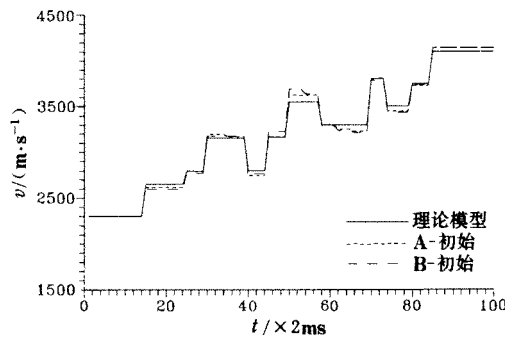


图 4d 反演结果对比
初始模型 B90 次迭代,初始模型 A70 次迭代

含噪声资料试算

为了检验方法对噪声干扰的适应程度,对含噪声资料进行了试算。速度模型、初始模型和约束条件与图 1a 相同,只是在理论记录中加入了 30% 的噪声。虽然噪声对反演过程有明显的影响,收敛速度减慢,反演结果的精度也有所下降,但合成记录与输入含噪理论记录有着良好的相似性(图 5)。另外,从图 6 来看,70 次迭代计算的反演结果仍然是可接受的,误差能量仅为 2.8%。所以,模拟退火反演具有一定的抗干扰能力。

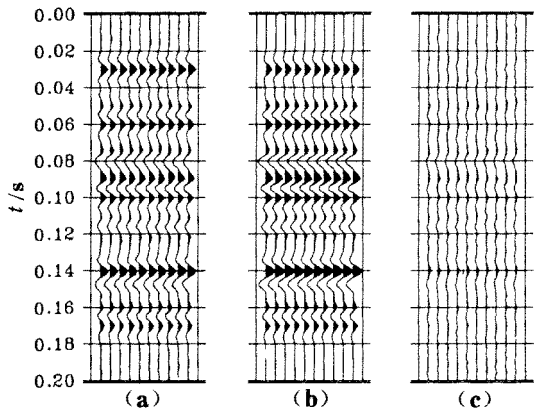


图 5 合成记录与含噪理论记录的对比

(a)含噪 30% 的理论记录;(b)合成记录;(c)剩余值((a)和(b)的差值)

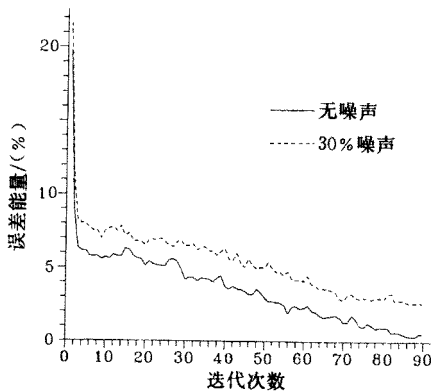


图 6a 误差能量

实际资料试算

利用本方法对大庆过 Gu272 井剖面(JG1 线)上的井旁记录道进行了反演处理。反演时窗为 1.0~1.5 s,是主要储层分布段。图 7 为模拟退火反演的层速度与声波测井层速度的对比,以泥岩为主的层段速度呈现低速,以砂岩为主的层段呈高速,各段中砂泥岩互层现象很明显,反演结果与测井结果吻合很好。图 8 为频谱对比图,由图可知,本方法反演的反射系数频谱与输入的井旁记录道相比频带宽度明显展宽、频率信息更为丰富,与声波测井反射系数的频谱

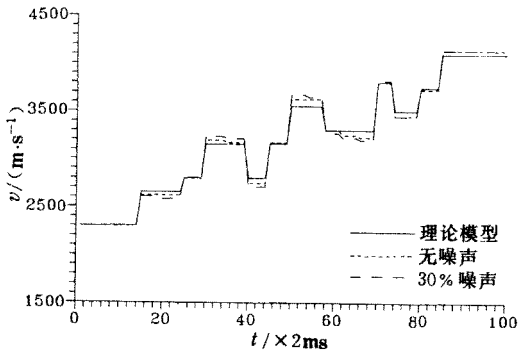


图 6b 含噪资料的反演结果对比

70 次迭代

有一定的相似性。可见,该方法用于实际资料处理是可行的。

结 论

从理论分析和试算结果可得如下结论:①模拟退火反演运用地震参数反演是可行的,其反演结果精度高、具有较宽的频带;②由初始模型和参数取值范围而构成的约束条件对模拟退火反演的影响主要体现为对收敛速度的影响,选择合理的约束条件可使反演收敛速度加快、减少计算量,并提高计算效率。因此,约束模拟退火反演实用性较强;③该方法具有一定的抗随机干

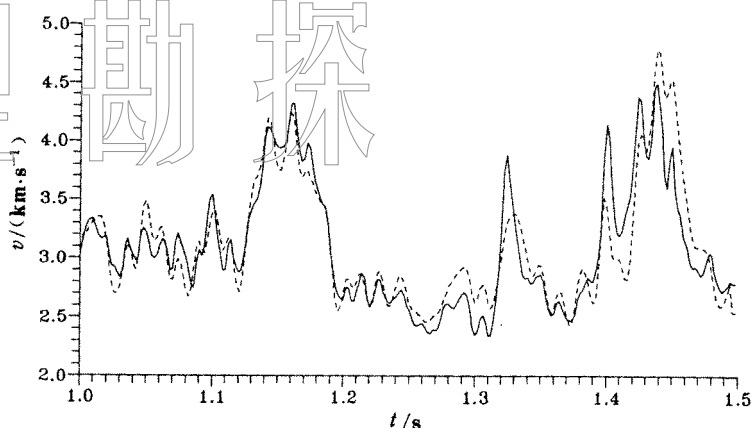


图 7 Gu272 井声波测井的层速度(实线)与井旁记录道反演的速度(虚线)对比

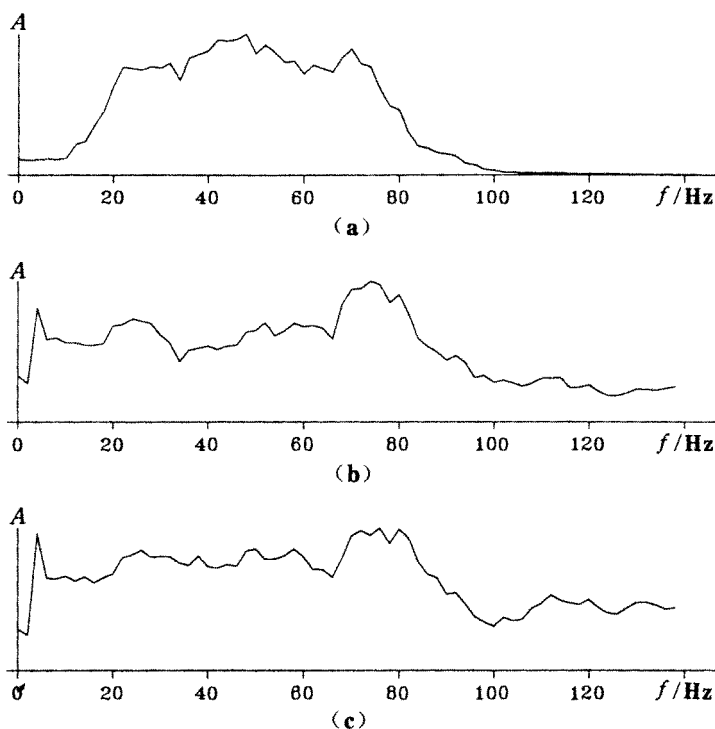


图 8 频谱对比图

(a)井旁记录道的频谱;(b)井旁记录道反演的反射系数频谱;(c)声波测井反射系数的频谱

扰的能力,能够适应含噪声的资料,并能用于实际资料的处理。

在本方法研究中得到了聂勋碧教授的指教,李灿平同志给予了大力帮助,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Gauthier O, Virieux J, Taratola A. Two-dimensional nonlinear inversion of seismic waveforms; Numerical results. *Geophysics*, 1986, 51(7): 1387~1403
- 2 Metropolis N et al. Equation of state calculations by fast computing machines. *J Chem Phys*, 1953, 21: 1087~1092

- 3 Kirkpatrick S, et al. Optimization by simulated annealing. *Science*, 1983, 220: 671~680
- 4 Rothman D H. Nonlinear inversion, statistical mechanics, and residual statics estimation. *Geophysics*, 1985, 50(12): 2784~2796
- 5 Rothman D H. Automatic estimation of large residual statics correction. *Geophysics*, 1986, 51(2): 332~346
- 6 Sen M K, Stoffa P L. Nonlinear one-dimensional seismic waveform inversion using simulated annealing. *Geophysics*, 1991, 56(10): 1624~1638
- 7 Martinez R D et al. Complex reservoir characterization by multiparameter constrained inversion. Presented at the SEG/EAEG Research Workshop on Reservoir Geophysics, 1988
- 8 Mansfield G. Interactive broadband constrained inversion. *Exploration Geophysics*, 1989, 20(1-2): 253~255
- 9 Vest R T. 利用地质约束条件进行地震数据反演, 第60届SEG年会论文集, 石油工业出版社, 1992
- 10 苏汝铿. 统计物理学, 复旦大学出版社, 1990
- 11 Geman S, Geman D. Stochastic relation, Gibbs distribution and Bayesian restoration of images. *IEEE Trans*, 1984, PAMI-6(6): 721~741
- 12 王梓坤. 概率论基础及其应用, 科学出版社, 1979

· 消息 ·

1994年中国石油天然气总公司勘探局 新区事业部油气勘探工作会议召开

中国石油天然气总公司勘探局新区勘探事业部1994年油气勘探工作会议于11月29日至12月4日在河北涿州物探局召开。总公司勘探局, 计划局, 科技局, 咨询中心, 新区事业部及有关油田领导, 特聘专家, 新区研究中心和新区事业所属20个勘探项目经理部等135人参加了会议。

会议总结了新区三个层次20个勘探项目1994年勘探成果并安排了1995年的工作。

一年来新区勘探工作成绩巨大, 成果喜人, 突出表现在与油田联合开展的勘探项目和以发现油气田为主的一些勘探项目及大区勘探项目上, 共取得了五项显著成果: ①找到了几个亿吨级的大油田; ②在5个区带的勘探中有重大进展; ③在4个构造的勘探上有重大发现; ④在大区勘探的评价和研究中取得了6点新认识; ⑤全面完成了1994年油气勘探的储量任务。

这些成绩的取得主要是: 在总公司勘探局的领导下, 各油田、单位的积极配合, 在新区勘探中依靠科技进步、大力推广高新技术、开展多学科的综合研究, 如小波变换、基于信号重构原理、利用测井资料层约束提高地震剖面的纵向分辨率, 利用分形、分维原理进行油气检测, 多参数提取, 神经网络, 模式识别, 聚类分析, 储层预测、油藏描述及三大评价技术等普遍推广应用; 新区勘探中实行了一整套科学管理, 利用市场机制, 全面推行项目管理中甲、乙方合同制, 引进了竞争机制, 提高了勘探质量、降低了工程造价、加快了勘探进度, 把有限的资金全部投入到油气勘探中去。

会议指出, 今后新区勘探要以获得更多的重大发现为目标, 加大新区、新盆地、新领域的勘探力度, 搞好油气战略接替区的勘探; 继续贯彻“稳定东部、发展西部, 油气并举”的方针; 走油公司的路子, 以效益为中心, 以勘探项目为核心新体制, 把新区勘探工作提高到一个新水平。

沙锡镒