

波阻抗反演的快速模拟退火算法

张宏兵¹,尚作萍¹,谭胜章²,罗万平²

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;2.中石化集团华东分公司,江苏 南京 210007)

摘要 波阻抗反演是储层参数及砂体预测不可缺少的内容,在地震勘探中占有重要位置.使用快速模拟退火算法(FSA)进行波阻抗反演,能避免目标函数值陷入局部极值区并可获得全局最优解.因此,用快速模拟退火算法进行波阻抗反演,并通过理论模型试算和实际资料的反演验证了该算法的应用效果.结果表明,FSA 反演结果不依赖于初值,FSA 收敛速度比常规模拟退火算法(SA)收敛速度更快,井点处的波阻抗反演结果与测井数据基本吻合.

关键词 地震反演 波阻抗反演 约束反演 快速模拟退火算法

中图分类号 P631.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2005)04-0434-04

地震资料的波阻抗反演是一个非线性问题^[1],这是因为地震反演中的目标函数是一个非凸性的复杂的多峰函数.如果使用对初始模型有很大依赖性的线性优化方法进行波阻抗反演,则容易陷入局部极值区而难以得到全局极值.近年来,出现了具有全局优化性能且通用性强的随机搜索算法,如遗传算法和模拟退火算法等^[2,3].尤其是模拟退火算法,由常规模拟退火法发展到了快速模拟退火算法(FSA)^[3],计算时效得到了较大提高.由于模拟退火算法只考虑目标函数,对初始模型的要求不高,并且可以随机地在全局域内进行搜索.这种具有较强搜索能力的算法能够保证反演结果基本上为最优解.因此,本文用快速模拟退火算法进行波阻抗反演,并通过理论模型试算和实际资料的反演验证了该算法的应用效果.

1 波阻抗反演的目标函数

在地震勘探中,地震响应的数学模型可以表示为

$$Y = W * R + N \tag{1}$$

式中: W ——地震子波序列; R ——地震反射系数序列; Y ——地震记录序列; N ——平衡的白噪音序列,服从高斯分布.由于 $\|Y - W * R\|^2$ 与 N 的分布相同,因此目标函数为

$$J_1 = (2\sigma^2)^{-1} \|Y - W * R\|^2 \tag{2}$$

波阻抗反演就是通过式(2)求使 J_1 达到最小时的 R 值.然而,波阻抗反演是一个病态问题,故需在目标函数中引入先验知识约束,以提高反演的稳定性.本文采用惩罚最小平方(或称为最大后验估计)^[4],则目标函数可以表示为测量数据估算可信度项和先验项的和,即

$$J(Z) = J_1(Z) + \lambda^2 J_2(Z) = (2\sigma^2)^{-1} \|Y - W * R\|^2 + \lambda^2 \sum_c \phi(D_c^k(Z)/\delta) \tag{3}$$

式中: Z ——波阻抗; $\phi(\cdot)$ ——势函数; λ, δ ——正则参数.先验项 J_2 为势函数的和,势函数通常是模型参数偏导数的函数.根据贝叶斯理论, J_2 与某些先验知识有关, J_1 与某些后验知识有关,常数 λ 决定着二者之间的协调关系.

从式(3)可以看出,波阻抗反演的目标函数是非线性的,使用线性反演方法很难获得满意的结果,故本文采用快速模拟退火算法.

2 快速模拟退火算法

模拟退火算法的基本思想由 Metropolis 等^[5]于 1953 年提出. Kirkpatrick 等^[6]认为固体退火过程与数学最

优化过程之间存在着很好的相似性. 1986 年, Rothman^[7] 首次将该方法引入地球物理方法中, 并成功地解决了地震勘探中大剩余静校正的估计问题.

常规模拟退火算法采用 Gibbs 分布(图 1). 从图 1 可以发现, Gibbs 分布两翼较低, 分布范围窄, 出现大的状态变化的可能性很小, 若模型 x 落入局部极值区, 跳出局部极值只能通过容忍函数产生的随机扰动来实现. 因此, 经典算法需要足够高的初始温度和足够缓慢的降温过程. 只有降低概率密度函数的尖锐程度, 才能保证收敛于全局最优解. 针对上述问题, 人们提出了快速模拟退火算法, 即以 Cauchy 型概率分布代替 Gibbs 分布. 在相同的温度条件下, Cauchy 分布要比 Gibbs 分布高而宽(即搜索范围大). 因此, 快速模拟退火过程中会出现大的状态变化. 这有利于随机模拟突破局部极值区而实现全局最优. 此外, 图 1 中 2 种分布在波 Fig.1 Cauchy distribution and Gibbs distribution 形宽度上的差别表现为 2 种算法退火速度的差异, 即快速模拟退火算法具有更高的退火速度.

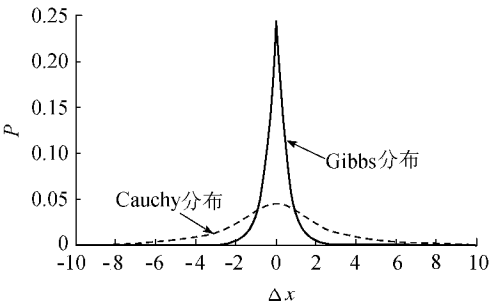


图 1 Cauchy 分布与 Gibbs 分布

2.1 模型扰动

模拟退火算法中的新模型是通过对当前模型的扰动得到的. Ingber(1989)在其提出的速度非常快的模拟退火算法(VFSA)中采用依赖于温度的似 Cauchy 分布产生新的模型^[3], 即

$$x'_i = x_i + y_i(x_{imax} - x_{imin}) \tag{4}$$

$$y_i = T_k \text{sgn}(\xi - 0.5) [(1 + 1/T_k)^{|2\xi - 1|} - 1] \tag{5}$$

式中: x_i ——当前模型参数; x'_i ——扰动后模型参数; ξ ——(0, 1) 区间上均匀分布的随机数; $[x_{imax}, x_{imin}]$ —— x_i 的取值范围, 且要求扰动后的 $x'_i \in [x_{imax}, x_{imin}]$; $\text{sgn}(\cdot)$ ——符号函数.

采用依赖于温度的似 Cauchy 分布产生新模型的优点是, 高温状态下可进行大范围的搜索, 低温状态下只在当前模型附近进行搜索, 而且由于似 Cauchy 分布有一个平坦的“尾巴”, 使其易于迅速跳出局部极值区. 这一改进加快了模拟退火算法的收敛速度.

2.2 接收概率

快速模拟退火算法用广义 Gibbs 分布产生接收概率 P , 即

$$P = [1 - (1 - h)\Delta E/T]^{1/(1-h)} \tag{6}$$

式中: ΔE ——能量差, $\Delta E = E(x') - E(x)$; T ——温度; h ——一实数. 按式(6)计算得到的概率进行判断是否接收新模型. 式(6)只考虑了能量的绝对变化. 然而, 物体由熔化状态逐渐冷却至结晶状态所出现的相变规则, 必须考虑能量的相对变化. 因此, 顾汉明等^[8]对式(6)进行了改进, 即

$$P = [1 - (h\Delta E/T)(E_1^\alpha/E^\beta)]^{1/h} \tag{7}$$

式中: E ——新模型的目标函数; E_1 ——当前模型的目标函数; α, β ——非负实数. 当 $\alpha = \beta = 0$ 时, 式(7)等于式(6). 如果使用改进后的接收概率, 可以使算法具有更快的搜索能力.

2.3 退火计划

本文采用的退火计划为

$$T(k) = T_0 \alpha^{1/n} \tag{8}$$

式中 α 为衰减因子, $0.7 \leq \alpha < 1$. 实际应用中, 可用 0.5 或 1 代替式(8)中的 $1/n$.

综上所述, 在快速模拟退火算法中, 可用式(4), (5)对当前模型进行扰动并产生新的模型, 用式(7)确定是否接收新模型, 用式(8)缓慢降温.

3 理论模型试算和实际资料反演

本文通过理论模型试算和实际资料反演来说明快速模拟退火算法的反演效果. 这里, 取初始温度为 10.0, 终止温度为 0.001, 温度衰减系数为 0.98, 状态转移次数为 2, $h = 5$. 同时, 在模拟退火过程中引入记忆功能, 以确保最终解为整个搜索过程中遇到过的最优解.

3.1 理论模型试算

理论模型是一个 5 层地质模型(第 3 层的厚度逐渐变薄), 各层速度 v 如表 1 所示. 为了方便起见, 假定

模型各层的密度为常数(实际上,密度变化不大).为此,以下都用速度取代波阻抗进行模型试算.原始速度模型见图 2(a).

地震子波选用 35 Hz 最小相位的理论 Ricker 子波,并用该子波与理论模型的反射系数进行褶积,获得了图 2(b)所示的原始地震记录(理论的).本文对一个简单的初始速度模型(3 层)(图 3(a))进行了反演,该初始模型的综合

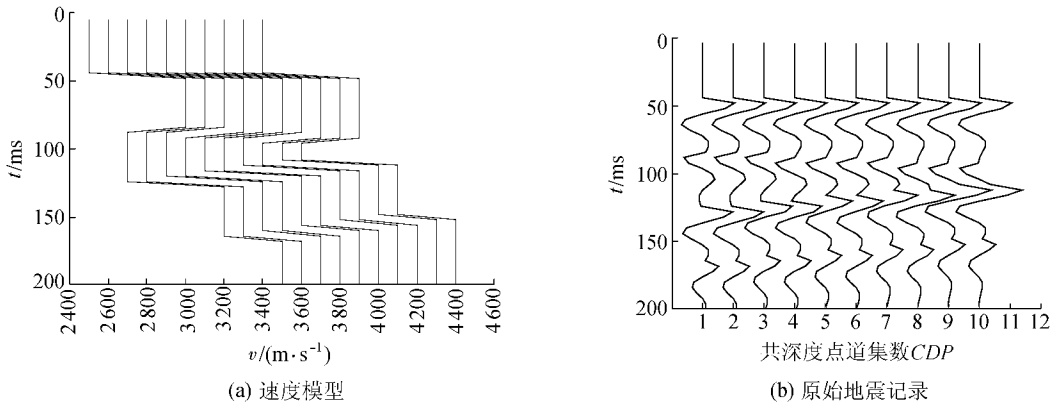


图 2 理论模型

Fig.2 Theoretic model

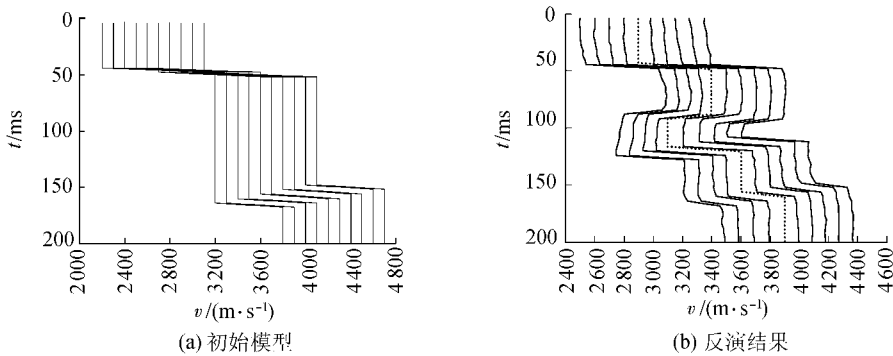


图 3 速度反演结果

Fig.3 Velocity inversion result

成记录与原始地震记录的相关系数仅为 0.58.图 3(b)为快速模拟退火约束反演结果,其相关系数达 0.980.从图 3(b)可以看出,反演结果的形态和绝对数值与图 2(a)原始速度模型的基本一致,达到了精度要求.图 4 为快速模拟退火算法与常规模拟退火算法收敛速度的对比.从图 4 可以看出,快速模拟退火算法的收敛速度较快,相同温度下,其相关系数更接近于 1.

3.2 实际资料反演

笔者对大庆地区的地震资料进行了波阻抗反演,本文只介绍其中的一条地震测线.该测线的原始地震剖面如图 5(a)所示.图 5(b)为初始波阻抗模型,其合成地震剖面与原始地震剖面的相关系数仅为 0.16.快速模拟退火算法中所采用的参数与理论模型试算中所采用的参数基本一致.图 6 为波阻抗反演结果,其相关系数达 0.973.从图 6 中可以清楚地看出上下层界面、断层的位置和地层的横向变化特征.这种结果可为砂体预测和储集层参数计算等提供必要的波阻抗参数.

4 结 论

a. 波阻抗反演具有非线性特点,采用快速模拟退火算法可以获得全局最优解.由于模拟退火算法不需

表 1 理论模型各层的速度

层号	1	2	3	4	5
$v/(m \cdot s^{-1})$	2500	3000	2700	3200	3500

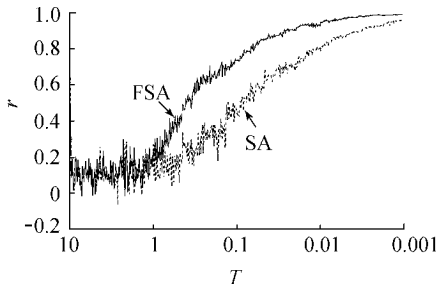


图 4 FSA 与 SA 的对比

Fig.4 Comparison of FSA with SA

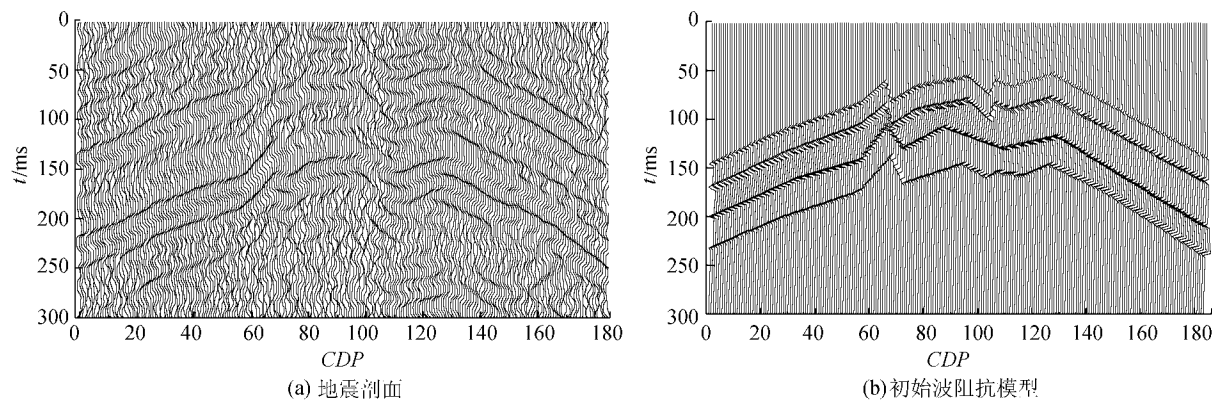


图 5 P434.6 测线的地震数据

Fig.5 Seismic data for line P434.6

要求解大型矩阵方程组,易于在反演的目标函数中加入约束条件,故反演比较容易实现.

b. 快速模拟退火算法对初值的要求不高,采用一个简单的初始速度模型就可以获得满意的结果,因此该算法具有很强的实用性.

c. 与常规模拟退火算法相比,快速模拟退火算法收敛速度明显加快.这不但减小了实际资料反演所需的工作量,而且便于该方法的推广使用.

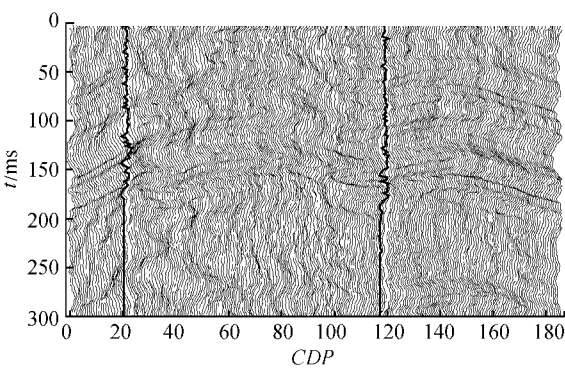


图 6 波阻抗反演结果

Fig.6 Wave impedance inversion result

参考文献：

[1] 杨文采. 地球物理反演的理论与方法[M]. 北京:地质出版社, 1997.1—35.

[2] 伊成,谢桂生,吕中育,等. 地震反演与非线性随机优化方法[J]. 物探化探计算技术,2001,23(1) 6—10.

[3] 王山山,李灿平,李青仁,等. 快速模拟退火地震反演[J]. 地球物理学报,1995,38(增刊 1) 123—134.

[4] 张宏兵,杨长春. 正则参数控制下的波阻抗约束反演[J]. 地球物理学报,2003,46(6) 827—834.

[5] METROPOLIS N,ROSENBLUTH A. Equation of state calculation by fast computing machines[J]. J of Chemical Physics,1953,21 1087—1092.

[6] KIRKPATRICK S,GELATT C D. Optimization by simulated annealing[J]. Science,1983,220 671—680.

[7] ROTHMAN D H. Automatic estimation of large residual static corrections[J]. Geophysics,1986,50 2784—2796.

[8] 顾汉明,江涛,王家映. 改进快速模拟退火方法进行 AVO 岩性参数反演[J]. 地球科学——中国地质大学学报,1999,24(4) : 418—422.

Fast simulated annealing algorithm for wave impedance inversion

ZHANG Hong-bing¹, SHANG Zuo-ping¹, TAN Sheng-zhang², LUO Wan-ping²
(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. East China Petroleum Bureau, SINOPEC Corp., Nanjing 210007, China)

Abstract Wave impedance inversion is essential in predicting reservoir properties and sand-body distribution, and plays an important role in seismic survey. In consideration of the fact that the fast simulated annealing (FSA) algorithm for wave impedance inversion may prevent the objective function from getting into local extreme ranges, and obtain the global optimum solution, the algorithm was adopted in this study, and the effectiveness of the algorithm was verified by trial calculation of theoretical model and inversion of measured data. The result indicates that the FSA result does not depend on the initial value, that the convergent speed of FSA is higher than that of the conventional simulated annealing (SA) algorithm, and that the FSA result of wave impedance inversion is coincident with well-logging data in boreholes.

Key words : seismic inversion ; wave impedance inversion ; constraint inversion ; fast simulated annealing (FSA) algorithm