

多尺度逐次逼近退火遗传算法反演地壳速度结构^{*}

潘纪顺^{1,2}, 唐 杰³, 刘 越², 潘素珍², 田晓峰², 吕芝全¹, 李 莉²

(1. 华北水利水电学院, 郑州 450011; 2. 中国地震局地球物理勘探中心, 郑州 450002

3. 河南有色金属地质矿产局第三地质大队, 河南南阳 474250)

摘要: 根据多尺度逐次逼近思想, 建立了多尺度逐次逼近退火遗传算法。该方法能有效地解决遗传算法中存在的收敛“早熟”问题。采用该方法对一个高速异常体进行了数值模拟试验, 并对青藏高原东北缘阿尼玛卿缝合带东段上部地壳速度结构实际资料进行了处理, 结果表明, 多尺度逐次逼近退火遗传算法能够较好地应用于地震走时层析成像研究。

关键词: 多尺度逐次逼近; 地震走时层析成像; 退火遗传算法; 阿尼玛卿缝合带

中图分类号: P315.3⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2008)03-0255-07

0 引言

地震走时层析成像是一种获取地壳速度结构的重要手段。地震走时和地壳速度之间存在着强非线性关系, 对这类问题的早期解决方法主要是局部的线性及线性化反演方法 (Bishop 等, 1985; Scales, 1987; White, 1989; Zhang, 1989; Kosloff 等, 1996)。这些方法一般需要计算目标函数的一阶或二阶导数, 常用的有广义逆方法、奇异值分解法、最速下降法、拟牛顿法、马奎特法、共轭梯度法和广义最小二乘法等。例如, Lutter 等 (1990) 将共轭梯度法应用到 PASSCAL Ouachita 试验的折射和反射走时数据上; Zelt (1992) 利用阻尼最小二乘法得到一种同时获得速度和界面的走时反演方法; Hobb (1992) 利用反投影法发展一种层析成像方法。然而, 这些局部反演方法不能够完全适应地震走时层析成像的需要, 因为对于需要做线性化处理的方法来讲, 其结果是不精确的, 对于需要解大型方程组的方法, 其解的可靠性有待讨论, 对于需要求导的方法, 若导数不存在则无法应用。尽管局部反演方法计算速度快, 可以反演模型空间几百个以上的参数, 但这些反演方法只利用局部有限的信息来改进初始模型, 因此对初始模型有很大的依赖性, 容易陷入解空

间的局部极值区而得不到全局极值。

非线性全局优化反演技术在地球物理领域的应用始于 20 世纪 80 年代中期, 全局方法一般分为枚举算法和随机算法。随机算法的典型代表是蒙特卡洛 (Monte Carlo) 方法 (Jin 和 Madariaga, 1994)、模拟退火算法 (SA) (Kirkpatrick, 1983; Chen, 2005) 和遗传算法 (GA) (Jin 和 Madariaga, 1993)。Rothman (1986) 首先提出利用模拟退火方法来解决反演难度较大的剩余静校正问题, Jin 等 (1994) 利用两步蒙特卡洛方法反演地壳速度, Stoffa (1991) 最先研究利用遗传算法进行地震波形的多参数非线性反演问题。总的说来, 全局反演方法简单、有效, 具有普遍适应性, 不存在局部反演方法所具有的诸多问题。但是全局随机方法计算十分耗时, 目前仅仅局限于反演简单的速度模型。相比较而言, 模拟退火算法和遗传算法的计算效率都比蒙特卡洛方法高, 并且计算与初始值的选择关系不大, 不需对问题作线性化处理。两者比较, 遗传算法的收敛速度更快。Sen 等人 (1997) 将遗传算法和模拟退火方法相结合得到称作退火遗传算法的方法, 崔建文等 (2004) 也有类似的做法。但遗传算法的“早熟”问题依旧没有得到解决。本文利用退火遗传算法, 采用一种多尺度逐次逼近的方法 (Bunk 等, 1995; Jin 等, 2000; 师学明等, 2000) 来反演地壳速度结

* 收稿日期: 2007-07-15.

基金项目: 国家自然科学基金 (40334040 和 40474049) 和华北水利水电学院高层次人才科研启动项目联合资助

构，一定程度上抑制了遗传算法中“早熟”问题的发生。

1 基本原理

遗传算法的基础是自然选择和自然遗传机制，其基本思想是基于模仿生物界的遗传过程，把问题的参数用基因代表，把问题的解用染色体代表（在计算机中为字符串），从而得到一个由具有不同染色体的个体组成的群体，这个群体在问题特定的环境里生存和竞争，适者有最好的机会生存和产生后代。后代随机地继承了父代的最好特征，并在生存环境的控制和支配下继续这一过程。这样群体的染色体都将逐渐适应环境，不断进化，最后收敛到一族最适应环境的类似个体，即得到问题最优的解。

遗传算法的一个主要缺点是收敛“早熟”问题，这实际上是问题的某种局部优化解。要继续进化，就要在群体中引入新个体，在一定程度上恢复基因的多样性。依据这一想法，根据一定的“早熟”判断标准，如果出现“早熟”现象，则进入模拟退火操作，生成新的个体，替代群体中相对较差的个体，从而在一定程度上解决“早熟”问题。

1.1 遗传算法操作

设群体由 M 个模型 $X_j (j=1, 2, \dots, M)$ 构成，其初始值由下式随机生成

$$(X_j)_i = (X_{min})_i + \xi(X_{max} - X_{min})_i \tag{1}$$

式中， X_{max} 和 X_{min} 分别为模型参数的最大值和最小值， ξ 是在 $[0, 1]$ 区间上均匀分布的随机变量，表示模型中的第 i 个参数。从各个目标函数计算其生存系数，确定生存系数最大值和平均值，计算生存概率：

$$f_j = \frac{1}{\text{sigma}} \exp(-\Phi(X_j)/T) \tag{2}$$

$$\text{sigma} = \sum_{j=1}^M \exp(-\Phi(X_j)/T) \tag{3}$$

式中， f_j 是个体的生存系数， T 是引入模拟退火算法中的温度，它是随计算进程逐渐减小的量，设

降温次数为 k 温度 $T_k = 0.99^k T_0$ ，其中 T_0 为初始温度。

平均生存系数由下式定义：

$$\bar{f} = \sum_{j=1}^M f_j / M \tag{4}$$

收敛判据由下式给出：

$$\max\{\Phi(X_j)\} \leq \epsilon_1 \tag{5}$$

式中， $\Phi(X_j)$ 为第 j 个模型的目标函数， ϵ_1 是给定的某一较小的常数。若无模型满足判据，则用 M 个模型建造新的子代群体，经历遗传算法的三种核心运算：

(1) “繁殖”

用轮赌法进行选择操作，生成父代种群，令

$$A = \sum_{j=1}^i f_j \tag{6}$$

当公式 (1) 中的 ξ 满足 $A_{j-1} < \xi \leq A_j$ 时，将第 j 个个体选入种群，作 M 次选择，可产生规模为 M 的父代种群。种群中的个体可以重复，生存系数较大的个体有可能被多次选中，在种群中形成优势群体；相反，生存系数较小的个体将以较大的机率被淘汰，这体现了生物界优胜劣汰的规律。为了不丧失已获得的进化成果，采用杰出个体保护策略，用群体中的最优个体替换种群中最差的个体。

(2) “交配”

首先采用等长度二进制编码，将模型中的参数用二进制表示，并将它们依序相连形成字串，其长度用 L 表示。对群体中的个体随机配对，在一对个体中，随机确定两个交叉位置 L_1 、 L_2 ，且 $L_1 = \xi_1 \cdot L$ 小于 $L_2 = \xi_2 \cdot L$ ，然后交换两个个体位于 $L_1 \sim L_2$ 之间的代码。

(3) “变异”

对“交配”产生的新个体，随机确定变异位置 $L_3 = \xi_3 \cdot L$ ，按变异概率 $P_m > \xi_4$ 进行变异操作，将 L_3 位置上的码变异的值，由 0 变为 1 或由 1 变为 0。

“早熟”判别依据下式：

$$f_{max} - f_{min} \leq \eta \tag{7}$$

式中, f_{\max} 和 f_{\min} 分别是群体中所有个体的生存系数的最大、最小值, η 为给定常数。如果判据成立, 则重新生成新的个体, 计算各自的生存系数, 并与旧的个体相比较, 如果新生成的个体的生存系数较大, 那么就依照一定的更新概率来决定是否替代旧的个体。

1.2 模拟退火算法操作

采用 Metropolis 算法, 对于适合度满足 $f < \bar{f}$ 的模型 X_i 随机生成一新模型

$$X_j = X_i + \Delta X_i \quad (8)$$

式中 ΔX_i 为模型参数的随机小扰动向量。

计算目标函数 $\Phi_{jg} = \Phi(X_{jg})$, 令 $\Delta\Phi = \Phi_{jg} - \Phi_i$; 如果 $\Delta\Phi < 0$, 则用 X_{jg} 替换 X_i ; 反之, 则计算接受概率 $p = \exp[-\Delta\Phi / T_k]$ 。当 $\text{rand} \leq p$ 时, 用 X_{jg} 替换 X_i 否则重新生成新模型。然后计算新个体的适合度 f 及平均适合度 \bar{f} 令 $k = k + 1$, 最终温度 $T_k = 0.99^k T_0$, 其中 T_0 为初始温度, k 为降温次数。

逐次逼近的思想是为了解决某一个具体问题, 而从一个与该问题的实质内容有着本质联系的较大范围开始进行解决, 逐步缩小范围, 逐步逼近, 最后达到所要求的解。根据多尺度逐次逼近的思想, 首先把速度场划分为不同的空间尺度, 定义网格节点上的速度作为待反演参数, 采用双三次样条函数模型参数化, 正问题采用一种快速、准确的有限差分走时计算方法 (Zhao 1996), 反问题采用多尺度逐次逼近退火遗传算法。首先在较大尺度空间范围内进行全局寻优, 将得到的结果作为下一级较小空间尺度全局寻优的初始值, 直至满足收敛判别标准。这是因为反问题的目标函数极值点的分布随空间尺度的变化而发生变化, 在大尺度上较少而且相互分得很开, 因而在大尺度上较易于求解。同时, 由于待反演的模型个数减少, “染色体” 的长度变短, “基因交换”、“变异” 等“遗传” 操作更为彻底, 有效地克服了基因丢失引起的“早熟” 收敛问题。将大尺度的解当作次一级尺度反问题的初始模型集, 所增加节点上的速度值经双三次样条插值得到, 然后再进行退火遗传反演, 如此类推逐次逼近全局最优解, 这便是

多尺度逐次逼近退火遗传算法的核心。据此, 可建立地震走时层析成像流程 (图 1)。

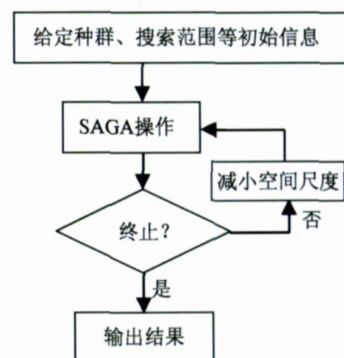


图 1 反演计算流程图

2 数值模拟试验

图 2 是一个 2 维速度模型, 沿 x 方向长 30 km, 沿 z 方向深 8 km, 地表速度 $v_0 = 2$ km/s, 沿 z 方向速度呈梯度变化, $dv/dz = 0.5$ (1/s), 在 x 方向 12 ~ 18 km 和 z 方向 1 ~ 7 km 的区域内制作一个速度异常区, 其速度值是原来数值增加 1 km/s。将激发点和接收点均放置在地表。炮点分别位于 0、5、10、15、20、25、30 km 处, 共 7 炮。接收点分别位于 0、1、2、3、...、30 km 处, 共 31 道, 对于每炮激发, 31 道都全部参与接收。正演走时计算采用规则网格 1 km \times 1 km。图 2b 为其射线分布图。在经历了 9、15、25、55、99 个节点共 5 次反演后, 对应网格分别为 15 km \times 4 km、7.5 km \times 4 km、7.5 km \times 2 km、3 km \times 2 km 和 3 km \times 1 km。对于初始模型的 9 个节点, 其水平节点位置为 0、

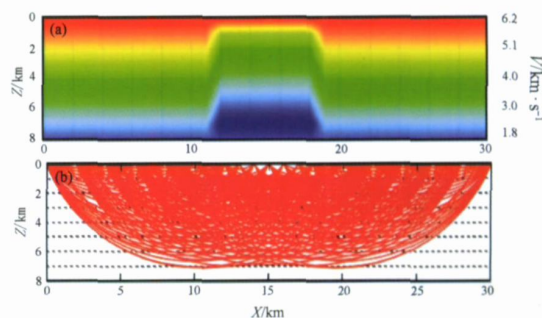


图 2 速度模型及合成数据的射线分布图

(a) 速度模型; (b) 合成数据的射线分布图

15、30 km 其垂向节点位于 0、4、8 km 深度上。给定 9 个节点处的速度搜索范围均为 1.0 ~ 7.0 km/s 遗传算法的参数采用交换概率 $P_c=0.90$ 变异概率 $P_m=0.05$ 模型群体大小 $Q=16$ 最大迭代次数为 500 随机种子数为 23。图 3 为不同节点数目的反演结果,随着节点数的增加,高速异常区域越来越得到良好的反映,当节点数大于 55 以后,反演结果趋于相同。

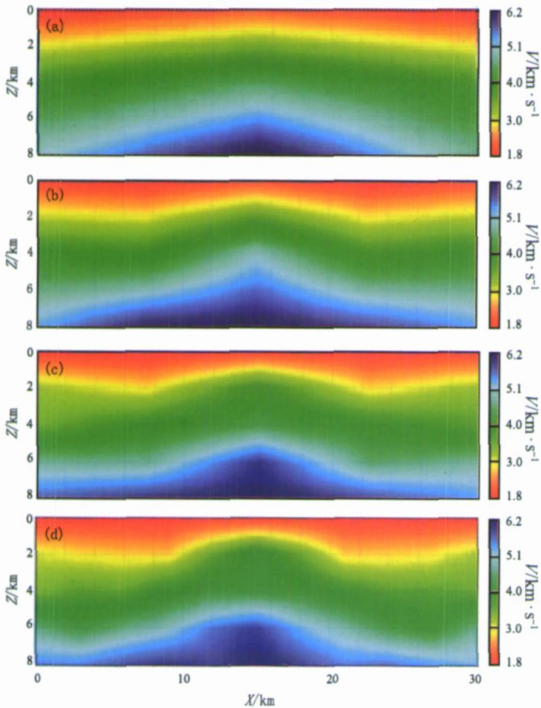


图 3 不同速度节点数的反演结果
(a) 9 个节点; (b) 15 个节点;
(c) 25 个节点; (d) 55 个节点

图 4 表明反演速度节点数为 55 时虚线以上部分的结果是可信的。图 4b 为检测板试验图,随着深度的增加,分辨逐渐变差,速度模型的两端分辨差,中间分辨较好,这是与射线分布有关的。图 4d 为走时残差随反演节点数的变化,节点 9 的初始残差是 0.748 s 节点 55 的走时残差减小为 0.022 s 之后,尽管速度节点数目增加,走时残差却不再减小。

图 5 是采用多尺度逐次逼近退火遗传算法 (a) 和直接采用退火遗传算法对 279 个格点速度反演 (b) 的结果对比,前者能够反映高速异常区域,而后者经历 500 代反演,走时残差从初始的

0.576 s 下降到 0.131 s 之后不再减小,此时不能够正确反映高速异常区。分析其原因,后者可能是由于收敛早熟问题而陷入局部极值区所造成的。

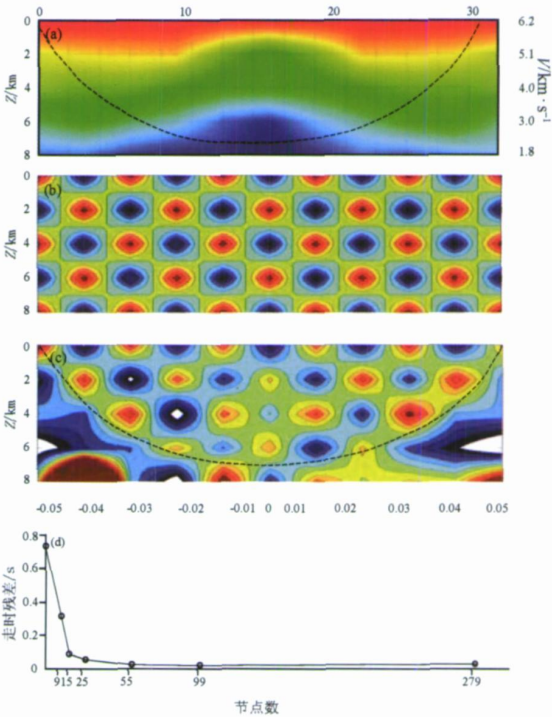


图 4 节点数为 55 的反演结果及其检测
(a) 55 节点数的反演结果; (b) 加 ± 50 m/s 的扰动;
(c) 扰动恢复情况; (d) 走时残差曲线

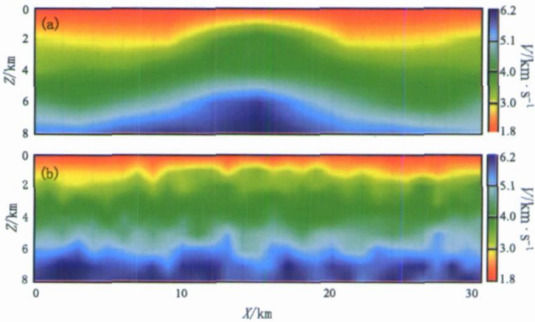


图 5 多尺度逐次逼近退火遗传算法 (a) 和退火遗传算法 (b) 的反演结果对比

3 实际应用

为研究阿尼玛卿缝合带东段及其两侧邻近区域的上部地壳结构特征,2004 年 5 ~ 6 月,中国地震局地球物理勘探中心在实施马尔康—古浪约 600 km 长的宽角折射、反射人工地震测深剖面的

同时, 在川北甘南交界地区完成了一条长为 210 km 走向近南北、与宽角折射、反射人工地震测深剖面完全重合的高分辨率折射地震探测剖面(图 6)。在沿剖面共进行了 10 次爆破, 获得了 877 个地震初至走时数据, 利用前文提到的多尺度逐次逼近退火遗传算法, 进行节点为 9、27、85、153、297、594、1 166 和 2 226 等一系列的反演, 对于初始模型的 9 个节点, 其水平节点位置为 190、295、410 km, 其垂向节点位于 0、10、20 km 深度上, 0 km 深度上节点的速度搜索范围为 1.0~8.0 km/s, 10 km 深度上节点的速度搜索范围为 4.0~8.0 km/s, 20 km 深度上节点的速度搜索范围为 6.0~8.0 km/s。遗传算法的参数采用交换概率 $P_c=0.90$ 变异概率 $P_m=0.05$ 模型群体大小 $Q=32$ 随机种子数为 23 最大迭代次数为 500。

图 7 为不同节点数目的反演结果, 随着节点数的增加, 反演出来的速度模型的空间尺度越来越小, 直到不变化。

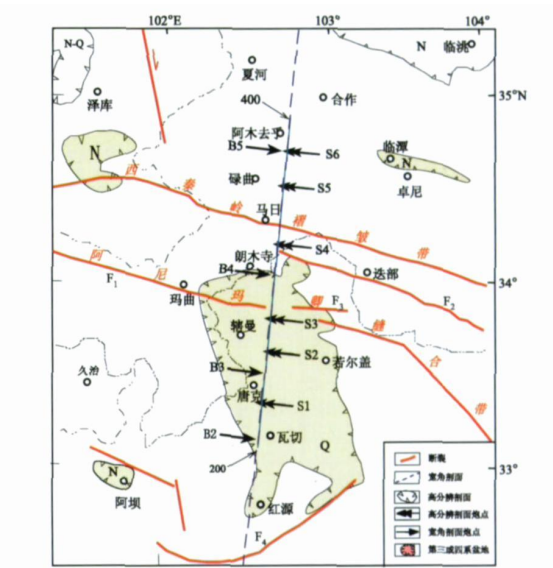


图 6 地质构造简图及高分辨折射剖面位置图
(资料源自马杏垣 (1989))
 F_1 : 库赛湖—玛沁断裂; F_2 : 武都—迭部断裂;
 F_3 : 舟曲—两当断裂; F_4 : 阿坝弧形断裂

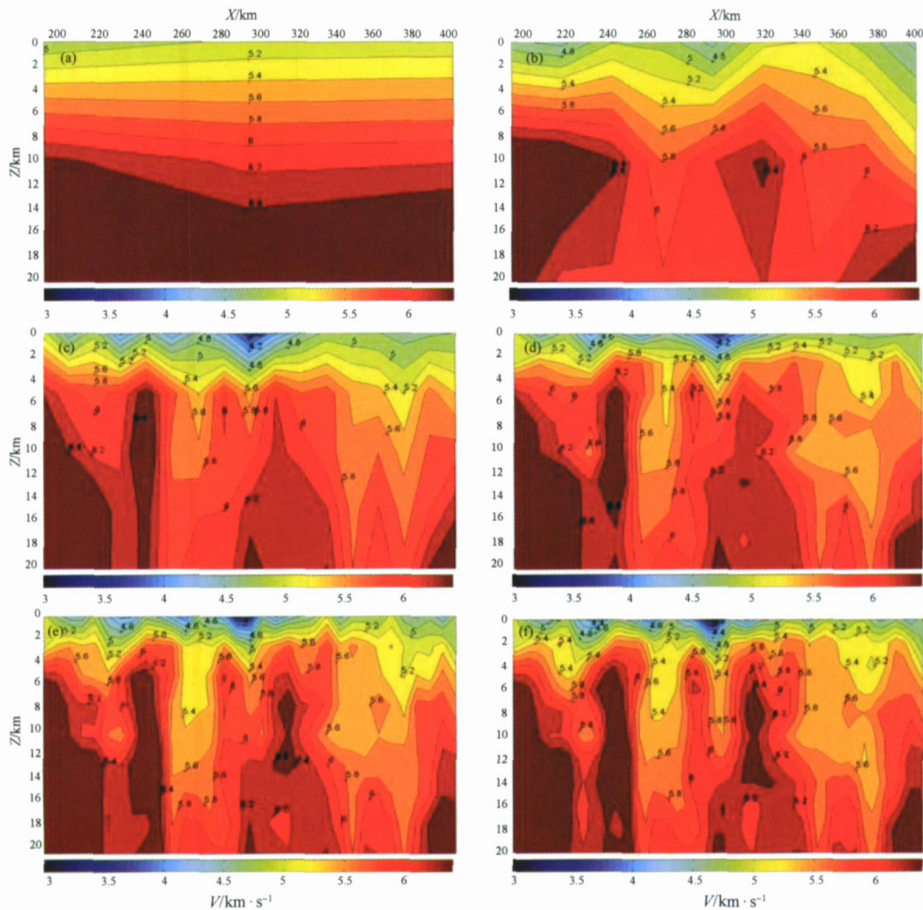


图 7 不同速度节点数的反演结果

(a) 9 个节点; (b) 27 个节点; (c) 85 个节点; (d) 153 个节点; (e) 297 个节点; (f) 594 个节点

图 8^a表示反演速度节点数 297 时虚线以上部分的结果是可信的, 图 8^b 为检测板试验图, 显示扰动恢复的情况, 虚线以上部分得到较好恢复, 表明该部分反演结果是可信的。图 8^c表示走时残差随反演节点数的变化, 初始残差是 0.867 s, 节点增大到 297 以后, 走时残差减小为 0.063 s, 之后, 尽管反演的速度节点增加, 但是走时残差却不再减小。

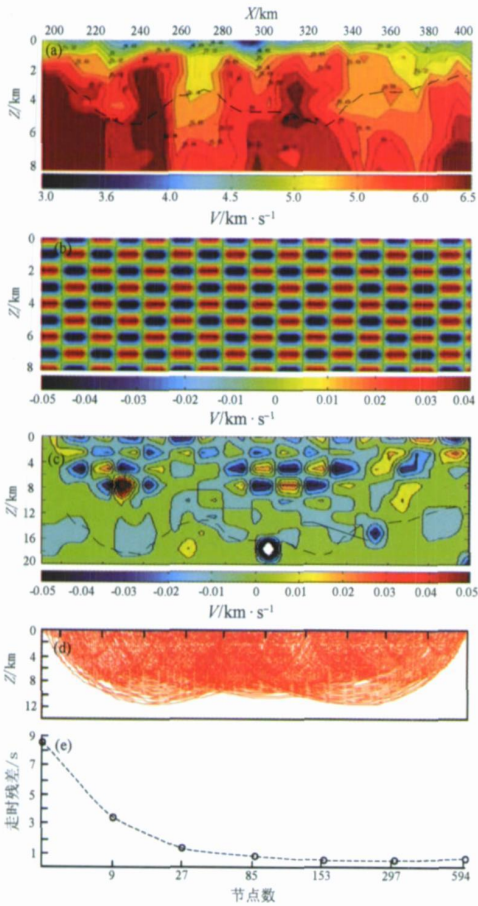


图 8 节点数为 297 的反演结果及其检测
(a) 297 节点数的反演结果; (b) 加 $\pm 50 \text{ m/s}$ 的扰动;
(c) 扰动恢复情况; (d) 合成数据的射线分布;
(e) 走时残差曲线

分析认为结晶基底的速度大约是 6.0 km/s 在测线南端 (190 km 桩号), 基底深度约 3.5 km ; 在 215~240 km 桩号之间, 结晶基底变深, 最深达 6.0 km ; 在 240~260 km 桩号之间, 结晶基底深度逐渐变浅至 3.0 km ; 在阿尼玛卿缝合带下, 速度横向变化剧烈, 260~280 km 桩号之间呈现一个低速带, 最大速度值仅为 $5.4 \sim 5.6 \text{ km/s}$ 这可能由于强烈的挤压, 此处基底已经破碎; 280~290 km

桩号之间, 速度值突然抬升, 说明此处基底完整性较好; 埋深大约 4.5 km ; 290~300 km 桩号之间又出现一个低速条带, 但是其规模没有前者大; 300~310 km 桩号之间速度急剧升高, 基底深度上抬至 3 km ; 在缝合带内, 基底深度整体呈南深北浅的趋势, 横向速度和基底深度均发生剧烈变化, 缝合带内的基底已经不再完整; 310 km 桩号以北的西秦岭褶皱带内, 依速度特征大体分为两段, 340 km 桩号为两者分界线, 桩位以南为高速段, 以北为低速段; 基底深度在 350 km 桩号处最浅, 约 2.0 km , 之后自南向北, 基底埋深逐渐加深。

在研究区有数条断裂通过剖面, 在 283 km 桩号附近, 速度从低速剧变为高速, 基底深度由深突然变浅, 这里正好是库赛湖—玛沁断裂穿过剖面的位置; 从图 8^a 中所示的速度低、高相间的状况来看, 该断裂可能是由多条断层组成的断裂带; 在 320~330 km 桩号之间, 速度横向变化亦较大, 基底深度从 2.2 km 突然加深至 4.5 km , 此处是武都—迭部断裂 (F_2) 的体现; 340 km 桩号是低速与高速的分界线, 是舟曲—两当断裂 (F_3) 的反映。可见, 在基底上速度结构的横向剧烈变化和基底深度的突变都是由于断层的存在引起的, 因此我们可以把速度横向剧烈变化和基底深度突变看作是断层存在的标志。

4 结论和讨论

数值模拟试验和实际资料的处理结果表明, 多尺度逐次逼近退火遗传算法是反演地壳速度结构的一种有效的非线性反演方法。用它可以较快地逼近全局最优解, 避免选取初始模型、计算 Jacob 偏导数矩阵和陷入局部极值等缺点。该方法克服了蒙特卡洛方法和模拟退火反演方法中的模型搜索时间较长的弱点, 是解决退火遗传算法“早熟”问题的一条有效途径。而且, 反演方法本身对观测系统的布设没有要求, 可以适用于任意复杂的观测系统。

多尺度逐次逼近退火遗传算法不能给出分辨矩阵, 但是, 对反演结果的分辨可依靠检测板、误差曲线、射线分布等手段来估计。同线性或线性化反演方法相比较, 全局反演方法的收敛速度仍显缓慢, 若能将多尺度逐次逼近退火遗传算法同局部反演方法 (如单纯形) 相结合, 则既可保

证全局性又具有一定的收敛速度。

王夫运博士、段永红博士、徐朝繁博士、刘志高级工程师和杨卓欣高级工程师等提供了宝贵的意见, 表示感谢。

参考文献:

崔建文. 2004. 一种改进的全局优化算法及其在面波频散曲线反演中的应用 [J]. 地球物理学报, 47 (3): 521—527.

师学明, 王家映, 张胜业, 等. 2000. 多尺度逐次逼近遗传算法反演大地电磁资料 [J]. 地球物理学报, 43 (2): 122—130.

Bishop T, Bube K, Cutler R et al. 1985. Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media [J]. Geophysics, 50: 903—923.

Bunks C, Salek FEM, Zaleski S et al. 1995. Multiscale seismic waveform inversion [J]. Geophysics, 60 (5): 1457—1473.

Hole J A, Clowes R M, Ellis R M. 1992. Interface inversion using broadband seismic refraction data and three-dimensional wave time calculations [J]. JGR, 97: 3417—3429.

Imprima L, Zollo A, Herrero A et al. 2002. Seismic imaging of complex structures by nonlinear traveltime inversion of dense wide-angle data: application to a thrust belt [J]. Geophys J Int, 151: 264—278.

Jin S, Beydoun W. 2000. 2D multiscale nonlinear velocity inversion [J]. Geophysical Prospecting, 48: 163—180.

Jin S, Madariaga R. 1994. Nonlinear velocity inversion by a two-step Monte Carlo method [J]. Geophysics, 59: 577—590.

Jin S, Madariaga R. 1993. Background velocity inversion with a genetic

algorithm [J]. Geophysical Research Letters, 20: 93—96.

Kirkpatrick S, Gelatt C D Jr, Vecchi M P. 1983. Optimization by simulated annealing [J]. Science, 220: 671—680.

Kosloff D, Sherwood J, Koren Z et al. 1996. Velocity and interface depth determination by tomography of depth-grated gathers [J]. Geophysics, 61: 1511—1523.

Lutter W J, Nowack R L. 1990. Inversion for crustal structure using reflections from the PASSCAL Ouachita Experiment [J]. JGR, 95: 4633—4646.

Rothman D H. 1986. Automatic estimation of large residual static correction. Geophysics, 51 (2): 322—346.

Scales J A. 1987. Topographic inversion via the conjugate gradient method [J]. Geophysics, 52: 179—185.

Sen M K, Stoffa P L. 1997. Global optimization methods in geophysical inversion [J]. ELSEVIER Science, New York, 140—144.

Stoffa P L, Sen M K. 1991. Nonlinear multiparameter optimization using genetic algorithms: inversion of plane-wave seismogram. Geophysics, 56 (11): 4794—1810.

White D J. 1989. Two-dimensional seismic refraction tomography [J]. Geophys J Int, 97: 223—245.

Zelt C A, Smith R B. 1992. Seismic traveltime inversion for 2-D crustal velocity structure [J]. Geophys J Int, 108: 16—34.

Zhang X K. 1989. Generalized inversion and its application in inverse scattering problems [J]. Journal of Computational Mathematics, 7 (4): 374—382.

Zhao P. 1996. An efficient computer program for wave front calculation by the finite difference method [J]. Computers & Geosciences, 22 (3): 239—251.

Inversion for Crustal Structure Using Multiscale SAGA Algorithm

PAN Jishun², TANG Jie, LU Yue, PAN Suzhen,

TIAN Xiaofeng, LU Zhiqiang, LILi

(1. North China Institute of Water Conservation and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, Henan, China)

2. Geophysical Exploration Center, CEA, Zhengzhou 450002, Henan, China)

(3. The 3rd Team of Henan Nonferrous Metal Geological Minerals Bureau, Nanyang 474250, Henan, China)

Abstract

SAGA is a combined algorithm of Simulated Annealing (SA) and Genetic Algorithm (GA). The method has the feature of higher searching efficiency than SA or GA alone, but can not radically solve the problem of convergence prematurity of GA. The multiscale SAGA algorithm, which is based on multiscale successive approximation, can effectively solve the problem. We used the method to reconstruct an anomalous high-velocity body in a numerical test model and to study the upper crustal structure characteristics of the eastern segment of the A'nyemaqen suture zone. Both test and practical application prove that the multiscale SAGA is a good tool for seismic tomography.

Key words: multiscale successive approximation; tomography of seismic traveltime; SAGA; A'nyemaqen suture zone.



温瑞智 中国地震局工程力学研究所信息技术与工程材料室主任、研究员,中国地震局新世纪百人计划人选。1994年毕业于大连理工大学工程力学系,获硕士学位。1999年毕业于中国地震局工程力学研究所,获博士学位,随即入哈尔滨工业大学力学博士后流动站和北京工业大学土木工程博士后流动站工作。中国地震学会会员、中国地理信息系统协会会员、加拿大土木工程协会会员、加拿大地震工程协会会员。主要从事强震动观测、断层对地震动影响、信息技术在防灾减灾领域中的应用等研究。



潘纪顺 中国地震局地球物理勘探中心高级工程师。2002年毕业于中国科学技术大学地球与空间科学学院固体地球物理学专业,获理学硕士学位。2007年毕业于中国地震局地球物理研究所固体地球物理学专业,获理学博士学位。主要从事浅层地震勘探、地震宽角折射、反射勘探、高分辨率折射地震勘探、火山监测、桩基检测等工作,主要研究方向是地震数据处理、地震成像与反演。



杜方 四川省地震局研究员。1992年毕业于武汉测绘科技大学,获硕士学位。主要从事现今地壳运动及动力学、前兆机理与地震预测方法等研究。



刘勇健 广东工业大学副教授。1993年毕业于成都理工学院油气地质与勘探专业,获工学硕士学位。现在中国科学院广州地球化学研究所地质构造专业攻读博士学位。主要从事岩土工程的教学与研究工作。



刘琼仙 云南省地震局高级工程师。1988年毕业于江苏工学院计算机及应用专业,获工学学士学位。主要从事强震动观测网络及信息的研究工作。



耿杰 山东省地震局副局长。1985年毕业于山东科技大学地质系。主要从事地震分析预报与研究工作。



胡先明 四川省地震局高级工程师。1981年毕业于国家地震局天水地震学校地球物理专业,1988年毕业于中国科学技术大学地球物理专业。主要从事水库诱发地震研究和地下水观测等工作。



王爱国 中国地震局地震预测研究所兰州基地副研究员。1994年毕业于兰州大学地质系,2002年获中国地震局兰州地震研究所硕士学位。主要从事地震地质、工程地震及数值模拟等方面的研究工作。