

地震剖面线条化的一种简单算法

郭良辉^{1,2}, 孟小红^{1,2}, 薛爱民³

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室和地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083

2. 中国地质大学地球物理与信息技术学院, 北京 100083

3. 北京派特森科技发展有限公司, 北京 100083

摘要: 地震剖面线条化是应用模式识别方法自动追踪剖面中的同相轴, 并自动绘制线条图。首先探测地震道中的周波, 并描述周波属性, 然后根据相邻三道周波相关的目标函数最小原则追踪同相轴, 描述同相轴属性, 并记录同相轴属性表。根据同相轴属性表, 可对地震剖面进行基于同相轴属性的统计分析和滤波以及定量解释。本文对现有的地震剖面线条化方法进行了改进简化, 实现地震剖面同相轴快速自动追踪和自动绘制线条图。合成数据和实际数据试验表明该方法计算简单、快速、有效。

关键词: 地震剖面; 同相轴; 自动追踪; 模式识别; 线条化。

中图分类号: P315.69

文章编号: 1000-2383(2007)04-0545-04

收稿日期: 2007-04-12

A Simple Algorithm for Seismic Skeletonization

GUO Liang-hui^{1,2}, MENG Xiao-hong^{1,2}, XUE Ai-min³

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Geo-detection Laboratory of the Ministry of Education, Beijing 100083, China

2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. Beijing Petrosound Geoservices Limited Corporation, Beijing 100083, China

Abstract: Seismic skeletonization is a pattern recognition method that is used to automatically track seismic events and produce an automatic line drawing. By using this method, the cycles in every seismic trace are first detected and the attributes of cycles are characterized. Then the seismic events are tracked based on the minimum of cost function of cycle correlation in three neighbor traces, and the attributes of events are characterized and the attributes are kept track of in a catalog, according to which, one can perform attribute-based analysis and data filtering and quantitatively interpretation. In this paper, the previous seismic skeletonization is modified and simplified and an quick automatic tracking of events and line drawing can be realized. The experiments on the synthetic data and the raw data show that the modified method is more efficient facilitates the calculation.

Key words: seismic profile; event; automatically tracking; pattern recognition; skeletonization.

地震剖面线条化就是将地震剖面中的同相轴用线条表示并绘制成图。该方法首先需要追踪出同相轴, 再用线条绘制成图。Lu (1982) 提出利用句法模式识别方法自动追踪地震同相轴, 他的剖面线条化方法有 4 个步骤: (1) 提取地震周波属性信息, 并作为模式基元; (2) 定义测量相邻两个地震道周波类似度的目标函数; (3) 应用句法匹配算法相关相邻两

个地震道周波, 搜寻目标函数最小的周波对构成同相轴; (4) 对所追踪出的同相轴用线条描绘。之后, Le and Nyland (1990) 对 Lu 的线条化方法作了些改进, 其周波属性参数更为详细, 目标函数的定义引入了更多信息, 并利用平行分析法作局部倾角趋势分析, 改正周波相关较弱的错误连接。Lu and Cheng (1990) 对目标函数的定义作了进一步改进, 即同时

基金项目: “油气藏地质及开发过程”国家重点实验室开放基金项目 (No. PLC200503); 北京市重点学科“地球探测与信息技术 (XK104910598)”资助。

作者简介: 郭良辉 (1980-), 男, 硕士研究生, 从事勘探地球物理科研工作。E-mail: guo_lianghui@163.com

考虑了相邻 3 个地震道周波,并用 BCC 法(Binary Consistency Checking)搜寻目标函数最优的周波对。Lu 利用迭代法来追踪同相轴,第一次迭代时追踪到强同相轴,在其后的迭代中追踪到弱同相轴。每次迭代中的追踪范围限制在前一次迭代已得到同相轴所勾划出的区域内。Li *et al.* (1997)在 Lu 的基础上引入周波属性面积概念,进一步改进优化目标函数的定义,并对追踪出来的同相轴描述其长度、倾角、频率、振幅等属性,记录为属性表。根据这个属性表,可以对地震剖面进行同相轴属性滤波(比如:长度滤波或倾角滤波或平滑滤波等)、统计分析和定量解释。Eaton and Vasudevan(2004)针对航磁资料的本质特征,简化了周波属性参数,并对目标函数中的周波属性面积取平方根,使得目标函数的维数一致;同时,去掉了 Lu 的迭代追踪步骤,使得方法计算简单快速。

本文借鉴 Eaton 的航磁剖面线条化方法思路,对 Li *et al.* (1997)的地震剖面线条化方法作了简化,形成地震剖面线条化的一种简单快速算法。首先,与 Li *et al.* (1997)所定义的 9 个周波属性(周波所在地震道地理坐标、波峰振幅值、波谷振幅值、波峰持续时间、波谷持续时间、波峰所在时间值、波谷所在时间值、波峰平均振幅、波谷平均振幅)不同,本文定义了 4 个周波属性,即波峰振幅值、波谷振幅值、峰谷时间间距和波峰所在时间值,使得周波属性描述简单又含盖了周波的基本信息;其次,类似于 Eaton and Vasudevan (2004)的方法,对目标函数定义中的周波属性面积取平方根,使得目标函数的维数一致;最后,与 Li 的 BCC 迭代法追踪同相轴不同,本文通过滑动窗口扫描,以最小化目标函数的原则直接追踪同相轴,该算法计算简单快速。本文最后通过合成数据和实际数据试验以验证方法的有效性。

1 方法原理

1.1 周波探测和周波属性描述

周波探测根据地震道的零值点位置将地震道分离成有序的周波,每个周波含有一个正波峰和一个负波谷(图 1a)。Lu and Cheng (1990)给出了周波分离的 3 个判断准则:

- (1)若相邻两个波峰(波谷)的间距大于某门限值,则该周波就应该分离;
- (2)若相邻波峰和波谷的振幅差大于某门限值,则该周波就应该分离;

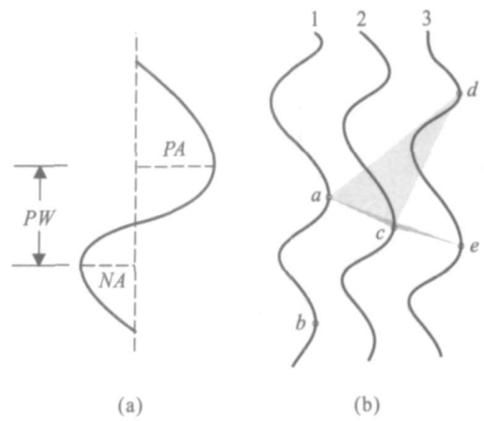


图 1 周波及其属性(a)和同相轴追踪示意图(b)

Fig. 1 Cycle and its attributes (a) and sketch map of event tracking (b).

(3)若其左右两边道在类似的时间范围内的波形都含有 2 个周波,则该周波应该分离。

周波属性描述为:波峰振幅值 PA 、波谷振幅值 NA 、峰谷间距 PW ,以及波峰所在的时间值 PL ,见图 1a 所示。将这些周波属性合并为无量纲的特征向量:

$$f = \left[\frac{PA}{\lambda_{PA}}, \frac{NA}{\lambda_{NA}}, \frac{PW}{\lambda_{PW}} \right]^T. \quad (1)$$

其中, λ_{PA} 、 λ_{NA} 、 λ_{PW} 分别为参考波峰振幅值、参考波谷振幅值、参考峰谷间距。

1.2 同相轴追踪和同相轴属性描述

同相轴追踪通过对相邻 3 个地震道的周波滑动窗口扫描,寻找目标函数为最小的一组周波(一组周波由相邻三道的 3 个周波组成)构成同相轴。

比如,当处理图 1b 的第 2 道中的周波 c 时,根据周波 c 波峰所在的时间值 PL_c ,分别搜寻第 1 道和第 3 道在 PL_c 上下一定时间窗口内的周波,比如第 1 道的周波 a 和周波 b ,第 3 道的周波 d 和周波 e 。由周波 a 、 b 、 c 和 d 可构成四组周波(a, c, d)、(a, c, e)、(b, c, d)和(b, c, e)。

在周波属性空间中,定义周波 a 和周波 c 的属性距离为:

$$D(a, c) = |f_a - f_c|. \quad (2)$$

其中, f_a 和 f_c 分别是周波 a 和周波 c 的属性向量,

$$|f| = |(f_1, f_2, f_3)|^T = \sqrt{\sum_{i=1}^3 f_i^2}, \quad f_i \text{ 为 } f \text{ 的第 } i \text{ 个分量}.$$

定义周波 a 、周波 c 和周波 e 的属性面积为

$$A(a, c, e) = D(a, c)D(c, e)\sin\theta. \quad (3)$$

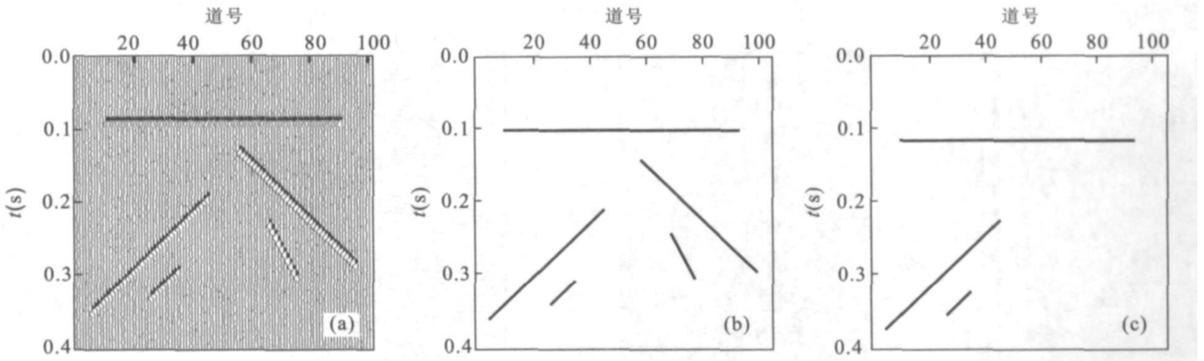


图 2 合成记录线条化结果

Fig. 2 The results of seismic skeletonization of synthetic data
a. 合成记录; b. 无同相轴属性滤波的线条图; c. 同相轴方向滤波后的线条图

其中, $\theta = \cos^{-1} \left[\frac{(f_a - f_c, f_c - f_e)}{D(a, c)D(c, e)} \right]$,

$(f, g) = \sum f_i \cdot g_i$.

根据属性距离(2)和属性面积(3), 定义周波组 (a, c, e) 的目标函数为:

$$\text{Cost}(a, c, e) = a_0 [D(a, c) + D(c, e)] + a_1 \sqrt{A(a, c, e)}. \quad (4)$$

其中, a_0, a_1 为权系数, 它们分别控制着属性距离和属性面积的影响程度.

根据方程(4)分别计算周波组 (a, c, d) 、 (a, c, e) 、 (b, c, d) 和 (b, c, e) 的各自目标函数, 其中目标函数为最小的那组周波构成同相轴.

同相轴属性描述为: 同相轴长度 N 、同相轴方向 α 、同相轴振幅和同相轴频率.

同相轴长度 N 即同相轴所遍历的道数. 设同相轴起始道号所在的时间值为 t_1 , 终止道号所在的时间值为 t_2 , 同相轴长度为 N , 则同相轴方向为 $\alpha = (t_1 - t_2) / (N - 1)$, 单位为 $\text{ms}/\text{道}$. 当 $\alpha = 0$, 则同相轴为水平的. 同相轴振幅即同相轴中周波的平均波峰振幅值. 同相轴频率即同相轴中周波的平均频率.

按照上述方法对地震剖面自动追踪同相轴和描述同相轴属性, 同时记录同相轴属性表文件. 这样, 根据同相轴属性表, 可对地震剖面进行基于同相轴属性的统计分析和滤波以及定量解释地震剖面.

1.3 线条图绘制

线条图绘制即用直线连接同相轴所遍历的各道周波波峰, 并保存为图形文件. 绘制线条图时, 可以根据同相轴属性表, 对所追踪出的同相轴作属性滤波, 比如: 长度滤波、方向滤波、振幅滤波或频率滤波, 或者同时进行多种同相轴属性滤波, 再用线条绘

制滤波后的同相轴.

1.4 实现步骤

本文的地震剖面线条化实现步骤如下: (1)探测各地震道周波; (2)描述各周波属性; (3)根据目标函数最小原则追踪同相轴; (4)描述同相轴属性, 并记录同相轴属性表文件; (5)根据同相轴属性表, 作同相轴属性滤波, 绘制线条图.

2 数据试验

2.1 合成数据试验

合成二维地震记录, 含 5 个同相轴, 其长度、方向各不相同, 地震子波均为正弦波 $y = \sin t$, 频率均为 62.5 Hz, 周波波峰振幅值均为 1. 对合成记录加入随机高斯噪音, 如图 2a 所示. 利用本文线条化方法对含噪音的合成记录进行线条化并绘制线条图, 图 2 显示了线条化结果. 图 2b 为无同相轴属性滤波的线条图, 可见 5 个同相轴被完整的追踪出; 图 2c 为同相轴方向 $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ 滤波后的线条图.

2.2 实际数据试验

实际二维地震剖面, 见图 3a 所示, 可见到很多同相轴, 其长度、方向、振幅、频率各不相同. 剖面含有噪音, 尤其是剖面 2 s 以下的记录, 由于噪音, 同相轴错断、参差不齐. 利用本文线条化方法对实际地震剖面进行线条化并绘制线条图, 图 3 显示了线条化结果. 图 3b 为无同相轴属性滤波的线条图, 可见本文方法良好地追踪出了同相轴, 尤其是剖面 2 s 以下的同相轴; 图 3c 为同相轴长度 $N \geq 10$ 滤波后的线条图; 图 3d 为同相轴长度 $N \geq 20$ 和方向 $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ 滤波后的线条图.

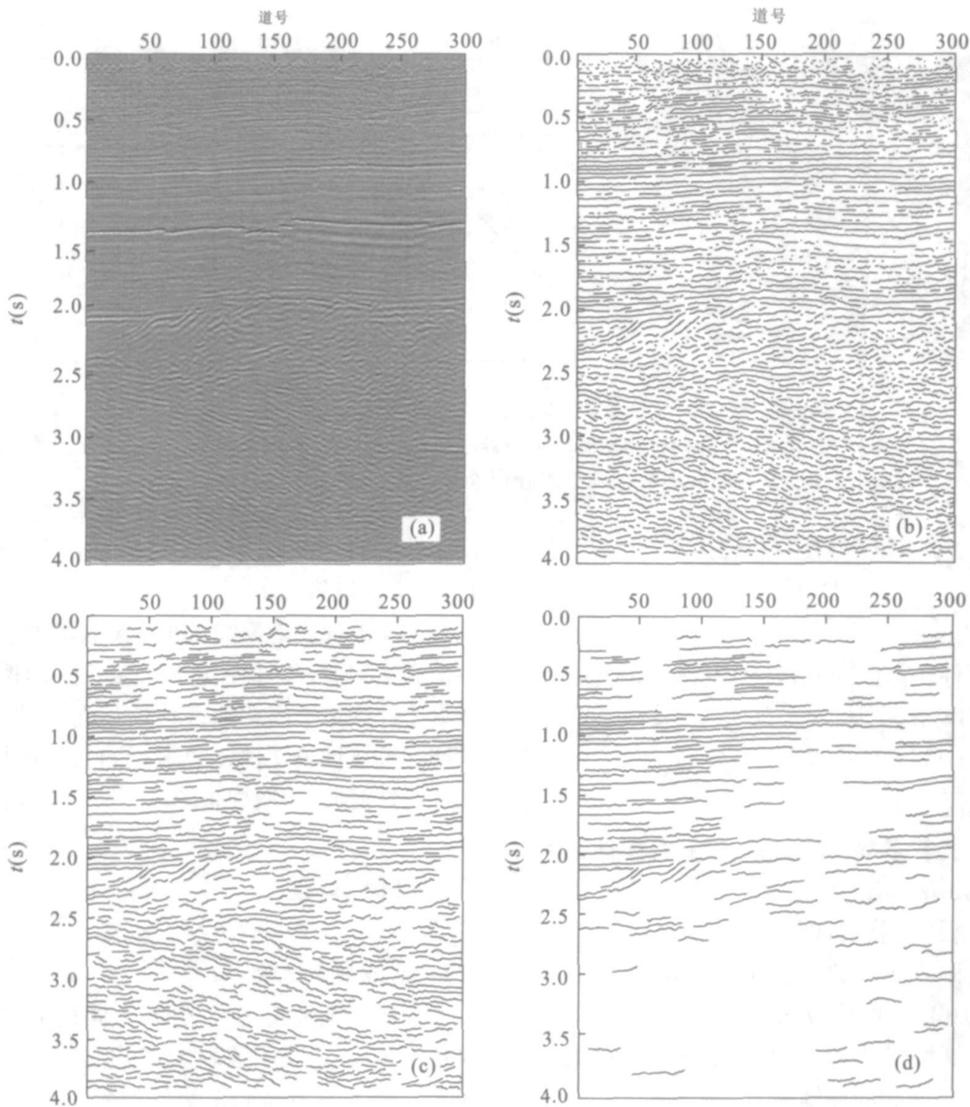


图 3 实际地震剖面线条化结果

Fig. 3 The results of seismic skeletonization of raw data

a. 实际地震剖面; b. 无同相轴属性滤波的线条图; c. 同相轴长度 $N \geq 10$ 滤波后的线条图; d. 同相轴长度 $N \geq 20$ 和方向 $0 \leq \alpha < 90^\circ$ 滤波后的线条图

3 结论

本文对目前已有的地震剖面线条化方法进行了改进, 计算简单、快速, 合成地震记录和实际地震剖面线条化试验结果表明本文方法有效. 经过本文地震剖面线条化处理, 自动追踪出同相轴, 并记录同相轴长度、方向、振幅、频率等属性表文件, 根据此属性表, 可以对同相轴作统计分析, 或作特定的同相轴属性滤波, 绘制线条图, 进而定性或定量解释地震剖面.

References

Eaton, D., Vasudevan, K., 2004. Skeletonization of aero-

magnetic data. *Geophysics* 69(2): 478–488.

Le, L. H. T., Nyland E., 1990. Pattern analysis of seismic records. *Geophysics*, 55(1): 20–28.

Li Q., Vasudevan, K., Cook, F. A., 1997. Seismic skeletonization: A new approach to interpretation of seismic reflection data. *Journal of Geophysical Research*, 102(4): 8427–8445.

Lu, S. Y., 1982. A string-to-string correlation algorithm for image skeletonization. Proc. Int. Joint Conf. Pattern Recognition. Munich, 178–180.

Lu, S. Y., Cheng, Y. C., 1990. An iterative approach to seismic skeletonization. *Geophysics* 55(10): 1312–1320.