

林年添,刘洪,李桂花等. 用于速度自动拾取的路径积分优化法与光顺处理技术. 地球物理学报, 2013, 56(1): 246-254, doi: 10.6038/cjg20130125.

Lin N T, Liu H, Li G H, et al. Auto-picking velocity by path-integral optimization and surface fairing. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(1): 246-254, doi: 10.6038/cjg20130125.

用于速度自动拾取的路径积分优化法 与光顺处理技术

林年添¹, 刘洪², 李桂花¹, 汤健健³, 魏立杰¹

1 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东科技大学地质科学与工程学院, 青岛 266590

2 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

3 浙江省第九地质大队, 浙江湖州 313000

摘 要 将用于图像处理的光顺技术引用到速度谱能量团曲面的处理环节, 借以提高速度谱的分辨率, 为最终获得高精确解提供一全新的途径. 具体思路是基于路径积分优化法——Viterbi 算法所具有的自动搜寻及获取最优解的功能, 将其应用于地震资料处理中的速度自动拾取, 使其向前做最大“能量团”的积分向后递归计算最优解——叠加速度, 但这种解的准确性往往与所定义的目标函数——速度谱的分辨率有关. 演算结果表明, Viterbi 算法与光顺处理技术的有机结合, 不仅提高了速度提取的精度, 而且实现了速度的自动拾取, 可提高常规地震资料处理的效率, 从而可快捷地为叠前深度偏移提供所需初始速度模型.

关键词 速度谱, 光顺处理, Viterbi 算法, 叠加速度, 自动拾取

doi: 10.6038/cjg20130125

中图分类号 P631

收稿日期 2012-04-11, 2012-12-20 收修定稿

Auto-picking velocity by path-integral optimization and surface fairing

LIN Nian-Tian¹, LIU Hong², LI Gui-Hua¹, TANG Jian-Jian¹, WEI Li-Jie¹

1 Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Minerals, College of Geological Sciences & Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

2 Institute of Geology & Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 No. 9 Geological Exploration Unit of Zhejiang, Zhejiang Huzhou 313000, China

Abstract In this paper, we introduce the Viterbi algorithm and apply it to auto pick the stack velocity. Here, the Viterbi algorithm makes the rule to integral the max velocity spectrum, “energy group”, forward and to get the optimal solution in recursion backward. The veracity of the solution has relation to the objective function, namely, the resolution of velocity spectrum. Therefore, we introduce a method of fairing for image processing to smooth the surface of velocity spectrum, to improve the resolution of velocity spectrum, finally, to provide a new way to obtain a solution of high accuracy. The results showed that it is not only helpful to improve precision of velocity picked, but also to realize auto-picking velocity by the Viterbi algorithm combined with surface fairing. Therefore, it is not only helpful to improve the efficiency of the conventional seismic data processing, but also rapid to provide the initial velocity for pre-stack

基金项目 国家自然科学基金项目(41174098, 40904009), 国家高技术研究发展计划(863 项目)(2012AA061202, 2013AA064201)联合资助.

作者简介 林年添, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 主要从事地震信号处理、成像方法及地质与地球物理综合解释、反演等研究.

E-mail: linnt@sina.com

depth migration.

Keywords Velocity spectrum, Fairing, The viterbi algorithm, Stacking velocity, Auto-picking

1 引言

拾取有效速度谱是速度分析中一个很重要的工作. 这项工作可通过手工拾取或者由计算机自动拾取来实现. 比起计算机算法, 手工拾取往往更具灵活性, 这是因为人的眼睛对聚焦性不是很高的速度谱具有较强的识别能力. 但是, 在估算速度谱参数方面, 手工拾取存在一定的不足, 主要表现为效率低下、成本高昂且精确度不高. 因此, 当所要处理的地震剖面长, 即包含的速度谱信息更加丰富时, 应将自动技术融合到速度拾取过程中.

自动技术运用的好, 不仅能解决因只做部分拾取致使丢失有效地质信息所带来的经济损失, 还能提高计算效率. 为此, 人们一直在寻求自动拾取的算法或方法. Toldi^[1] 的不做拾取的速度分析、Zhang 和 Claerbout^[2] 非线性优化自动拾取及陈志德等^[3] 的蒙特卡洛自动层速度拾取, 在获取相对简单地质体的速度时已经取得了一定的效果, 但对于解决复杂地质体的速度分析都同样存在难于获得精确解的问题.

Viterbi 算子是一种具有自动搜寻目标函数的算子. 该算子因被 Viterbi 于 1967 年首用于解码问题而得名. 由于该算子的方便易用性和灵活性, 被广泛地应用于与解码问题相关联的不同领域中. McEliece^[4]、Yoshua^[5] 及 Luz^[6] 等相继对该算法在解码等问题中的应用做了详尽的论述. Zhang^[7] 将其引入并用于解决地震质料处理中关于拾取的一些问题, 林年添等^[8] 将其应用到复杂地质体速度自动拾取, 均取得了良好的效果.

自动拾取常常通过优化来实现, 它包括两个步骤: 定义目标函数和优化拾取. 上述所引入的自动搜寻算法——Viterbi 算子便是用于第二步骤中优化拾取. 但为自动搜寻算法提供的数据源(目标函数), 有时往往由于其曲面光顺程度低, 直接影响到搜寻解的准确性. 对于速度拾取而言, 速度谱的聚焦性差, 自动拾取得到的速度将可能是不准确的, 所得的动校正等结果也会是不可靠的. 因此, 有必要对上述的数据源进行先期的光顺处理.

光顺处理在汽车、飞机、船舶等设计制造业中起着重要作用, 这是由于在曲面设计造型中常常通过

光顺处理来提高目标体表曲面顺滑程度^[9-12], 以达到工程设计要求. 针对不同设计目的和精度的要求等^[13], 在相关领域已经涌现或派生了多种多样有关光顺处理的算法并不同程度地取得了良好效果^[14-18].

借鉴曲面设计造型中光顺处理原理, 本文将光顺处理技术引入到速度谱曲面的光顺处理中, 以解决上述速度谱曲面可能存在的不光滑问题. 即对速度谱曲面进行加权均值滤波处理(目标函数的再定义), 以获取顺滑程度高的速度谱曲面^[12]. 如此, 再应用约束优化搜寻算子进行叠加速度的拾取, 就可以获得精度更高的速度^[19].

综上所述, 通过优化来实现自动拾取的两个步骤修改为: ①定义与再定义目标函数; ②优化拾取.

2 速度谱的光顺处理表示

若有一个共中心点 CMP 道集数据 $u(i, j)$, 则根据 Taner 等^[20] 的相似度准则可获得速度谱 $S(t_0, \tilde{V})$, 如式(1). 为便于后面的描述, 首先引入 $\mu(x_i, y_j)$, 使之等价于 $S(t_0, \tilde{V})$:

$$\mu(x_i, y_j) = S(t_0, \tilde{V}) = \frac{\sum_{j'=0}^{M'} \left\{ \sum_{i'=1}^{N'} u(i', j' + r_{i'}) \right\}^2}{N' \sum_{j'=0}^{M'} \sum_{i'=1}^{N'} u^2(i', j' + r_{i'})}, \quad (1)$$

式中, $i' = (1, 2, \dots, N')$ 为地震道号; $j' = (0, 1, 2, \dots, M')$ 为道内采样点号; $r_{i'} = \frac{t_{i'}}{\Delta t}$ 为延迟时间内的采样点数, 其中 $t_{i'}$ 为波延迟到达时间, Δt 为地震记录的采样率; $u(i', j' + r_{i'})$ 表示第 i' 道地震记录, 第 $(j' + r_{i'})$ 采样值; $S(t_0, \tilde{V})$ 为相似系数, 即速度谱, 其中 t_0 为零炮检距的双程反射时间, \tilde{V} 为等价的均方根速度; $\mu(x_i, y_j) = S(t_0, \tilde{V})$, 故 $x_i = t_0 (i = 0, 1, \dots, m)$, $x_j = \tilde{V} (j = 0, 1, \dots, n)$, x_i 为垂直反射时间序列, y_j 为均方根速度序列.

式(1)即为由相似度准则得到的速度谱(定义目标函数), 但由于所得速度谱曲面可能存在不光顺情况, 不利于约束优化拾取. 为此, 需要对速度谱曲面进行光顺处理(再定义目标函数).

现引入另一个量 $\omega(x_i, y_j)$, 它与 $\mu(x_i, y_j)$ 之间的关系如下:

$$\omega(x_i, y_j) = \frac{\sum_{jn=n_1}^{n_2} \sum_{im=m_1}^{m_2} \mu(x_{im}, y_{jn})}{(m_2 - m_1) \times (n_2 - n_1)}, \quad (2)$$

式中 $m_1 = i - \frac{k_m}{2}$, $m_2 = i + \frac{k_m}{2}$ 分别表示以垂直反射时间序列 x_i 为中心的窗口内最小值和最大值, k_m 为该窗口横向长度, im 为该窗口内时间采样点号, 满足 $0 \leq m_1 \leq im \leq m_2 \leq (m-1)$. $n_1 = j - \frac{k_n}{2}$, $n_2 = j + \frac{k_n}{2}$ 则分别表示以均方根速度序列 y_j 为中心的窗口内最小值和最大值, k_n 为该窗口纵向长度, jn 为该窗口内速度采样点号, 满足 $0 \leq n_1 \leq jn \leq n_2 \leq (n-1)$.

式(2)即为利用均值滤波函数对目标函数进行再定义(速度谱的光顺处理)的结果, $\omega(x_i, y_j)$ 即为新的速度谱.

不难看出, 函数 $\omega(x_i, y_j)$ 是以点 (x_i, y_j) 为中心坐标, 在 $(m_2 - m_1) \times (n_2 - n_1)$ 窗口内对原速度谱 $\mu(x_i, y_j)$ 求平均而得到的新函数, 窗口大小可根据需要进行选择. 窗口的每次移动, 就意味着产生一个新的 $\omega(x_i, y_j)$ [19]. 对于点 (x_i, y_j) 上的速度谱函数(未经再定义的函数)而言, 函数 $\omega(x_i, y_j)$ 赋予了其一个具有新意义的值[19]. 它的意义在于: 上述所构造的函数 $\omega(x_i, y_j)$ 是 $(m_2 - m_1) \times (n_2 - n_1)$ 窗口内各点的速度谱 $\mu(x_i, y_j)$ 作为变量共同贡献的结果. 新构造的 $\omega(x_i, y_j)$ 其各点彼此间更具内在的联系, 因为 (x_i, y_j) 上的 $\mu(x_i, y_j)$ 对 $\omega(x_i, y_j)$ 做了贡献, 对于点 (x_{i-1}, y_{j-1}) 上的 $\omega(x_{i-1}, y_{j-1})$ 或对于点 (x_{i+1}, y_{j+1}) 上的 $\omega(x_{i+1}, y_{j+1})$ 也都做了贡献. $\omega(x_i, y_j)$ 将做为下述 Viterbi 算法搜寻最大“能量团”的数据源. 为区别于速度谱函数 $\mu(x_i, y_j)$, 称 $\omega(x_i, y_j)$ 为视速度谱函数[19].

3 Viterbi 算法及速度优化拾取

Viterbi 算法是一种具有寻找最短路径的最优化搜寻算法. 它在电信领域中被广泛应用于译解卷积码等问题. 该算法的基本原理出自这样的观察[19]: 即, 如果点 A 与点 C 间存在一条最短路径, 而该最短路径中存在一个中间点 B, 那么, 点 A 与点 B 间的这段路径也是该路径段间最短的. Viterbi 算法涵盖两个基本步骤: 一是向前做最短路径的累积计算; 二是向后做递减跟踪, 寻找最优解. 本文, 将此

算法应用到速度的自动拾取中, 则可描述为: 向前做速度谱最大“能量团”的累积计算及向后递减跟踪, 寻找最佳速度.

假设 $Z = z_1^T = (z_1, z_2, \dots, z_T)$ 为一个所观测到的序列, 则其联合概率分布总可表示为

$$P(z_1^T) = P(z_1) \prod_{t=2}^T P(z_t | z_1^{t-1}), \quad (3)$$

式中, $P(z_1)$ 为初始观测序列概率, $P(z_t | z_1^{t-1})$ 为观测序列条件分布概率, $t = 1, 2, \dots, T$. 式(3)表明: 在 t 时刻, 观测序列变量 z_t 的条件分布概率依赖于 z_{t-1} 前所有的值, $P(z_{t-1}^{t-1})$ 为其先验概率, $P(z_t | z_1^{t-1})$ 为其后验概率. 文中引入一个状态序列变量(非观测序列的变量)以便有效地记录具有最大先验概率的序列. 该状态序列变量也称为传递序列变量, 其所携带的 z_{t-1} 之前的信息有助于描述下一个观测序列 z_t 的分布[19].

如果在 t 时刻的状态 q_t 是 $\{1, \dots, M\}$ 内一个有限的数, 并且假设只是从 0 到 T 的处理时间, 而且已知初始状态和最终状态. 那么, 状态序列可以用有限的矢量来表示, 即

$$Q = q_1^T = (q_1, q_2, \dots, q_T).$$

一阶的 Markov 过程就是用 $P(q_k | q_1, q_2, \dots, q_{k-1})$ 表示以 0 到 $k-1$ 时刻的所有状态作为条件的 k 时刻状态 q_k 的概率. 换言之, k 时刻的状态 q_k 确定了从开始直到 $k-1$ 时刻的所有状态, 而且这些状态唯一地依赖于前一时刻的状态(如 $k-1$ 时刻的状态 q_{k-1}), 即

$$P(q_k | q_1, q_2, \dots, q_{k-1}) = P(q_k | q_{k-1})$$

或表示为

$$P(q_1^T) = P(q_1) \prod_{t=2}^T P(q_t | q_1^{t-1}), \quad (4)$$

式中, $P(q_1)$ 为初始状态概率, $P(q_t | q_1^{t-1})$ 为状态序列条件分布概率, $t = 1, 2, \dots, T$.

根据 Bayes 规则, 前述的观察序列 z_1^T 与状态序列 q_1^T 之间的关系可表示如下:

$$P(z_t | q_1^t, z_1^{t-1}) = P(z_t | q_t), \quad (5)$$

$$P(q_{t+1} | q_1^t, z_1^t) = P(q_{t+1} | q_t), \quad (6)$$

式(5)中, $P(z_t | q_t)$ 为发射概率, 即两种序列联合条件分布概率, $P(z_1^{t-1})$ 为先验概率, 联合分布条件分布概率 $P(z_t | q_1^t)$ 为后验概率; 式(6)中, $P(q_{t+1} | q_t)$ 为传递概率, 即状态序列条件分布概率, $P(z_1^t)$ 为先验概率, 状态序列条件分布概率 $P(q_{t+1} | q_1^t)$ 为后验概率. 式(5)、(6)中, $t = 1, 2, \dots, T$.

简言之, 当要预测观察序列或下一个状态时, 状

态变量 q_k 包含了过去所有相关的状态变量和观察序列的值,也就是这些值的和.依据条件独立概率分布的假设,观察序列和状态变量联合概率分布的关系还可以简化为

$$P(z_1^T, q_1^T) = P(q_1) \prod_{t=1}^{T-1} P(q_{t+1} | q_t) \prod_{t=1}^T P(z_t | q_t), \quad (7)$$

式中, $p(q_1)$ 为初始状态概率, $P(z_t | q_t)$ 为发射概率, $P(q_{t+1} | q_t)$ 为传递概率, $t = 1, 2, \dots, T$.

那么,如果给定一个观察序列 z_1^T , 从而推断与之相对应的最可能的状态序列 q_1^T , 这个可以利用下面的最大化算法得到.

$$q_1^{T*} = \operatorname{argmax}_{q_1^T} P(q_1^T | z_1^T) = \operatorname{argmax}_{q_1^T} P(q_1^T, z_1^T), \quad (8)$$

式中 q_1^{T*} 为条件分布概率 $P(q_1^T | z_1^T)$ 或联合概率分布 $P(q_1^T, z_1^T)$ 的最大值.

Viterbi 算法能有效地递归求解上述的最大值. 首先定义

$$V(iu, t) = \max_{q_1^{t-1}} P(z_1^t, q_1^{t-1}, q_t = iu), \quad (9)$$

式中 $iu = q_t (t = 1, 2, \dots, T)$, $V(iu, t)$ 即为联合概率分布 $P(z_1^t, q_1^{t-1})$ 的最大取值,实际上就是观测序列 $P(z_1^t)$ 的最大取值,但它依赖于先验概率,即状态序列分布概率 $P(q_1^{t-1})$.

然后由下式递归计算得到

$$V(iu, t) = P(z_t | q_t) \max_{jv} \{P(q_t | q_{t-1}) V(jv, t-1)\}, \quad (10)$$

式中, $iu = q_t, jv = q_{t-1}, t = 1, 2, \dots, T$. $P(z_t | q_t = iu)$ 表示 t 时刻的观测序列和状态序列的联合概率分布, $P(q_t = iu | q_{t-1} = jv)$ 为状态序列条件分布概率,或称传递概率,主要起到递归计算作用,而 $V(jv, t-1)$ 表示传递序列变量 $q_{t-1} = jv$ 携带了 z_{t-1} 之前所有信息.

$V(iu, t)$ 的初始化为 $V(iu, 1) = P(z_1 | q_1) P(q_1)$. 因此我们获得最后的序列.

$$\max_{q_1^T} P(z_1^T, q_1^T) = \max_{iu} V(iu, T).$$

如果上述递归式的最大增量 $jv^*(iu, t)$ 得以确定,那么最佳的 q_1^{T*} 就可以通过一个向后递归计算得到,即利用 $q_{t-1}^* = jv^*(q_t^*, t)$ 并从 $q_T^* = \operatorname{argmax}_{iu} V(iu, T)$ 向后递归计算.注意,方程(10)在结构上与向前最大值累积计算阶段的方程(7)相似,即,其求和结果很简单地被最大值取代了.

如果我们把按照上述方法构造得到的视速度谱 $w(x_i, y_j)$ 看做一个观察序列 z_1^T , 而把对应于上述

状态序列 q_1^T 的用于记录路径的传递变量记为 $L(x_i, y_j) = x_{ik} |_{y_{j-1}}$, 我们可以把递归求解最短路径和求取最大值的过程用于求取速度,只是将“寻找最短路径”的过程转变为“搜寻最大速度谱能量团”的问题.

最大速度谱“能量团”向前累积(积分)过程可表示为

$$\begin{cases} \bar{w}(x_i, y_j) = \bar{w}_{\max}(x_{ik}, y_{j-1}) |_{ik=i-k}^{i+k} + w(x_i, y_j) \\ L(x_i, y_j) = x_{ik} |_{y_{j-1}} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)等同于式(5)和式(6). 其中 $w(x_i, y_j) = z_1^T$, $\bar{w}(x_i, y_j) = P(z_t | z_1^{t-1}), L(x_i, y_j) = P(q_t | q_1^{t-1})$. $\bar{w}(x_i, y_j)$ 是在约束条件下累积的结果. 其中 $\bar{w}_{\max}(x_{ik}, y_{j-1}) |_{ik=i-k}^{i+k}$ 表示以 (x_{ik}, y_{j-1}) 坐标为中心,以 ik 为取值范围,取 y_{j-1} 之前累积的结果中最大值 \bar{w}_{\max} 与下一个观测序列 $z_t = w(x_i, y_j)$ 求和即得 $\bar{w}(x_i, y_j)$. 而 $L(x_i, y_j) = P(q_t | q_1^{t-1})$ 表示记录了这个求和累积的过程,即路径. 其中表示约束条件的 ik 满足 $0 \leq (i-k) \leq ik \leq (i+k) \leq m-1$. 坐标 (x_i, y_j) 符号的含义同式(1)和(2).

当上述的累积达到 $y_j = y_{n-1}$ 时,即可搜寻最大值 $\bar{w}_{\max}(x_i, y_n)$, 并记与最大值 $\bar{w}_{\max}(x_i, y_n)$ 相对应的 $L(x_i, y_{n-1}) = x_{ik} |_{y_{n-2}}$ 为 $x_{ipick} |_{y_{n-1}} = x_i$, 然后根据 Viterbi 算法的递归搜寻原理向后递归搜寻最短路径并计算所需速度值 $v(y_j)$.

$$\begin{cases} x_{ipick} |_{y_j} = L(x_{ipick} |_{y_{j+1}}, y_j), \\ v(y_j) = x_{ipick} |_{y_j}. \end{cases} \quad (12)$$

式中 $x_{ipick} |_{y_j} = L(x_{ipick} |_{y_{j+1}}, y_j)$ 表示所选择累积积分最大值所对应路径中的每个点都对应所需要的速度值,即拾取得到的 $x_{ipick} |_{y_{n-1}} = x_i$.

4 应用实例分析

本文所述的速度自动拾取步骤为:首先,输入的数据要求为共中心点 CMP 道集 $u(i, j)$; 第二步,利用相似度系数判别准则制作速度谱(式(1)); 第三步,利用均值滤波函数(式(2))对相似度速度谱 $\mu(x_i, y_j)$ 再定义(速度谱光顺处理)得到视速度谱函数 $w(x_i, y_j)$, 此外,在这一步骤中通常会根据不同来源的数据,选择适当大小的窗口以获取最佳光顺处理效果;第四步,则是利用第三步得到的视速度谱通过 Viterbi 算法——方程式(10)拾取所需的叠加速度;第五步,是利用式(13)做动校正 NMO 处理:

$$t = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v_{\text{NMO}}^2}}, \quad (13)$$

式中, t_0 为零炮检距的双程反射时间; v_{NMO} 为动校正速度; $t(x)$ 为炮检距 x 上的反射时间.

第六步, 做水平叠加处理并输出结果.

上述步骤中, 步骤一到步骤四为速度优化自动拾取的核心步骤, 第五、第六步主要用于直观评估所拾取速度实际效果.

图 1 为一个水平层模型, 图 2(a1) 为图 1 得到的相似度速度谱, 而图 2(b1) 则为图 2(a1) 经光滑处理得到的速度谱. 后者相比于前者, 其“能量团”更集中, 且非主流“能量团”得到了压制. 图 2(a2) 和图 2(b2) 所示分别为图 2(a1) 和图 2(b1) 中局部(图中小方框部分)的“能量团”, 前者的等值线不光滑, 且

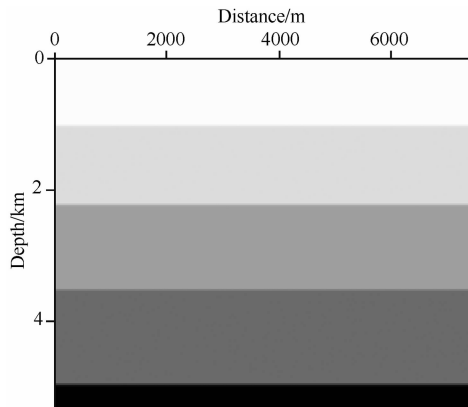
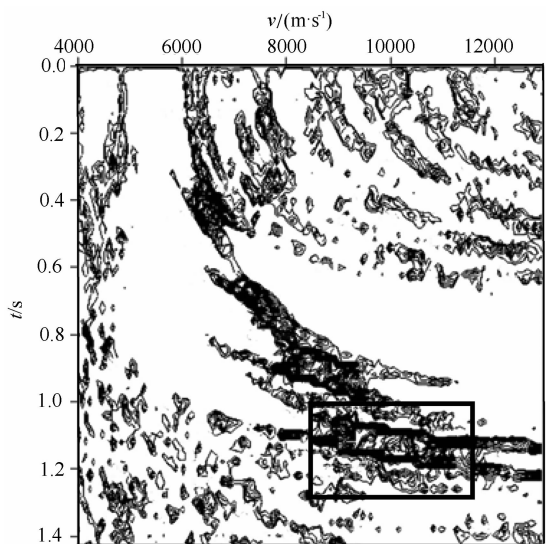
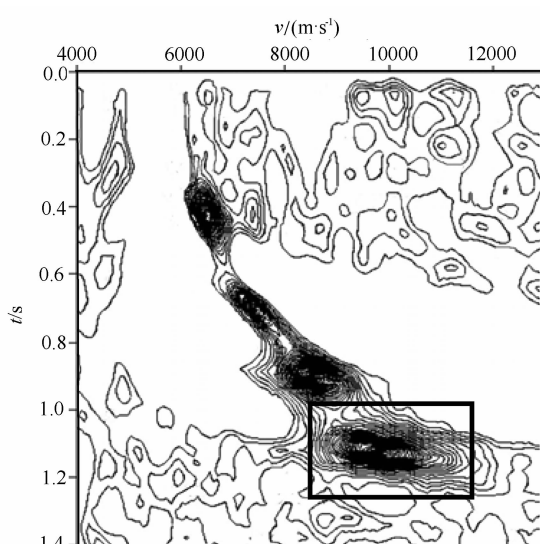


图 1 一个水平层地质模型

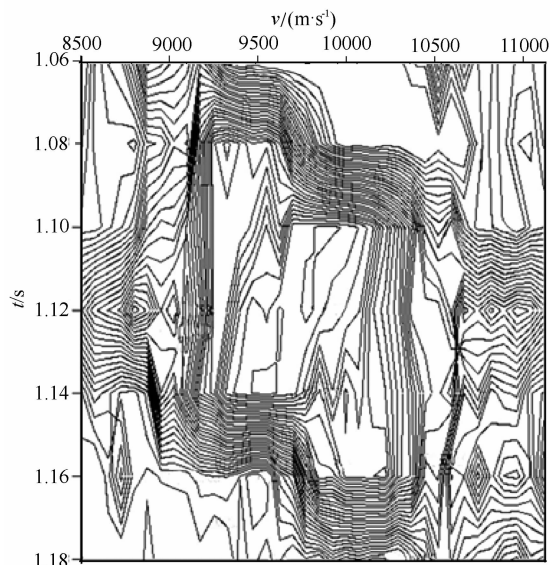
Fig. 1 A horizontal geological model



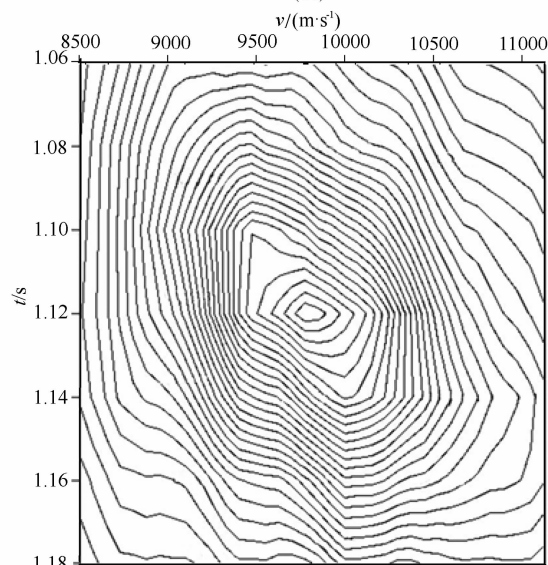
(a1)



(b1)



(a2)



(b2)

图 2 由图 1 水平层地质模型得到的相似度速度谱(CMP3500)光滑处理前后比较图 (a1) 常规相似度速度谱; (b1) 经过光滑处理的速度谱; (a2) 和 (b2) 分别为 (a1) 和 (b1) 中局部(小方框内)的速度谱.

Fig. 2 Comparison on the semblance velocity spectrum(CMP3500), before and after fairing, acquired from the horizontal geological model (Fig. 1).

(a1) Shows the source semblance velocity spectrum; (b1) Shows the one filtered by weighted mean from (a1); (a2) and (b2) Show the local velocity spectrum correspondent to the smaller block diagram.

不规则,主“能量团”边上存在异常小峰值,这不论对于人工拾取还是对于计算机自动拾取都存在困难,即很难判定“能量团”最大值准确位置.而后者则一目了然,使上述问题很容易得到解决.

根据均值滤波原理,通过建立不同大小模块(待处理像素其周围邻近像素的不同)可获得表面光顺程度不同的新图像,即速度谱.图 3 就是一个选择不同大小模块对拾取产生不同效果的应用实例,其地质模型如图 1 所示.图 3a 为未进行光顺处理就直接用 Viterbi 算法拾取速度并做动校正处理的结果,很明显这是一个动校正明显不足的结果.图 3b 和图 3c 为选取不同大小模块光顺处理的结果,从中不难看出,模块的大小直接影响最终结果.因此选择适当大小的模块对于获取更好的图像(准确的速度)非常重要.图 3c 相对于图 3b,其结果更接近于实际的速度值(见图 3d).图 3d 为用已知准确速度动校正的结果.

图 4 是另一个速度模型(Marmosi 模型的局部),由其所得 CMP100 的速度谱如图 5.该速度谱曲面光顺处理前后的情形如同图 2.图 5(b1)为图 5(a1)经光顺处理得到的速度谱,图 5(a2)和图 5(b2)

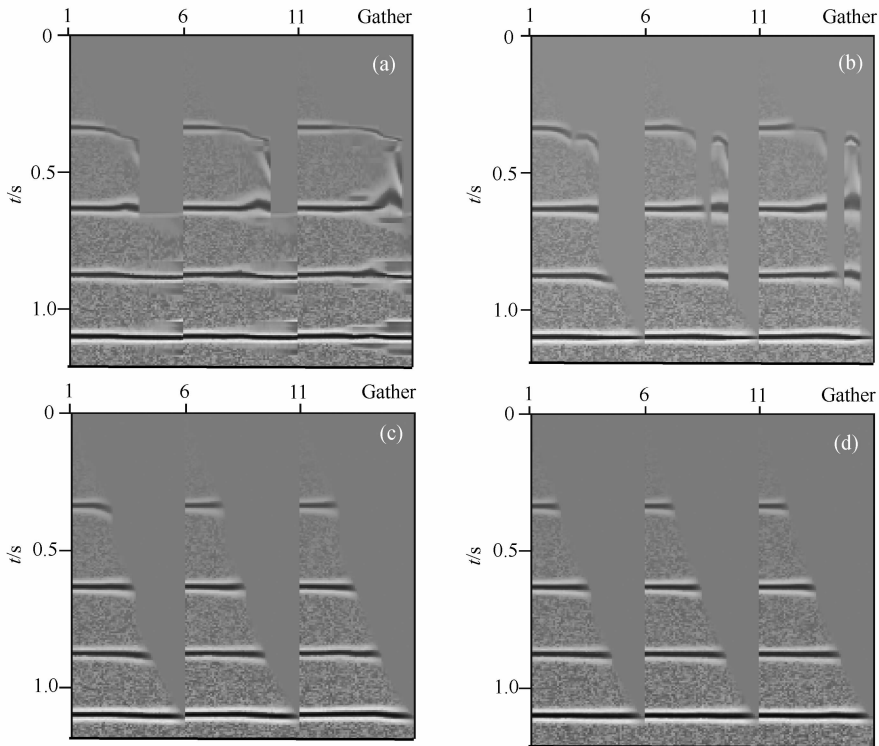


图 3 地震数据 CMP 道集所制作速度谱经光顺处理和利用 Viterbi 算法自动拾取速度并做动校正的结果 (a) 未进行光顺处理的结果; (b, c) 选取不同大小小时窗进行光顺处理的结果; (d) 则为用已知准确速度动校正和叠加的结果.

Fig. 3 Normal moveout correction from the staking velocity auto-picked by the Viterbi algorithm with the surface fairing data

(a) Shows a staking profile from the unsmoothed velocity spectrum; (b, c) Show the result from the smoothed one with different time windows; (d) Shows the one from known and correct stacking velocity.

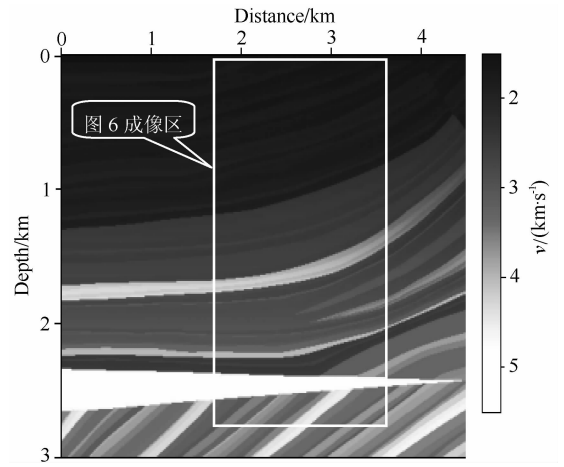


图 4 速度模型(Marmosi 模型局部)

Fig. 4 Velocity model (part of Marmosi model)

所示分别为图 5(a1)和图 5(b1)中的局部(图中小方框部分),光顺处理后的速度谱(图 5b)精度明显优于未进行光顺的(图 5a).利用 Viterbi 算法分别对两种不同的速度进行优化自动拾取,并将所拾取速度用于动校正及水平叠加叠加结果如图 6(图 4 中的局部成像),图 6a 为未进行光顺处理就直接用 Viterbi 算法拾取速度并做动校正叠加的结果,图 6b

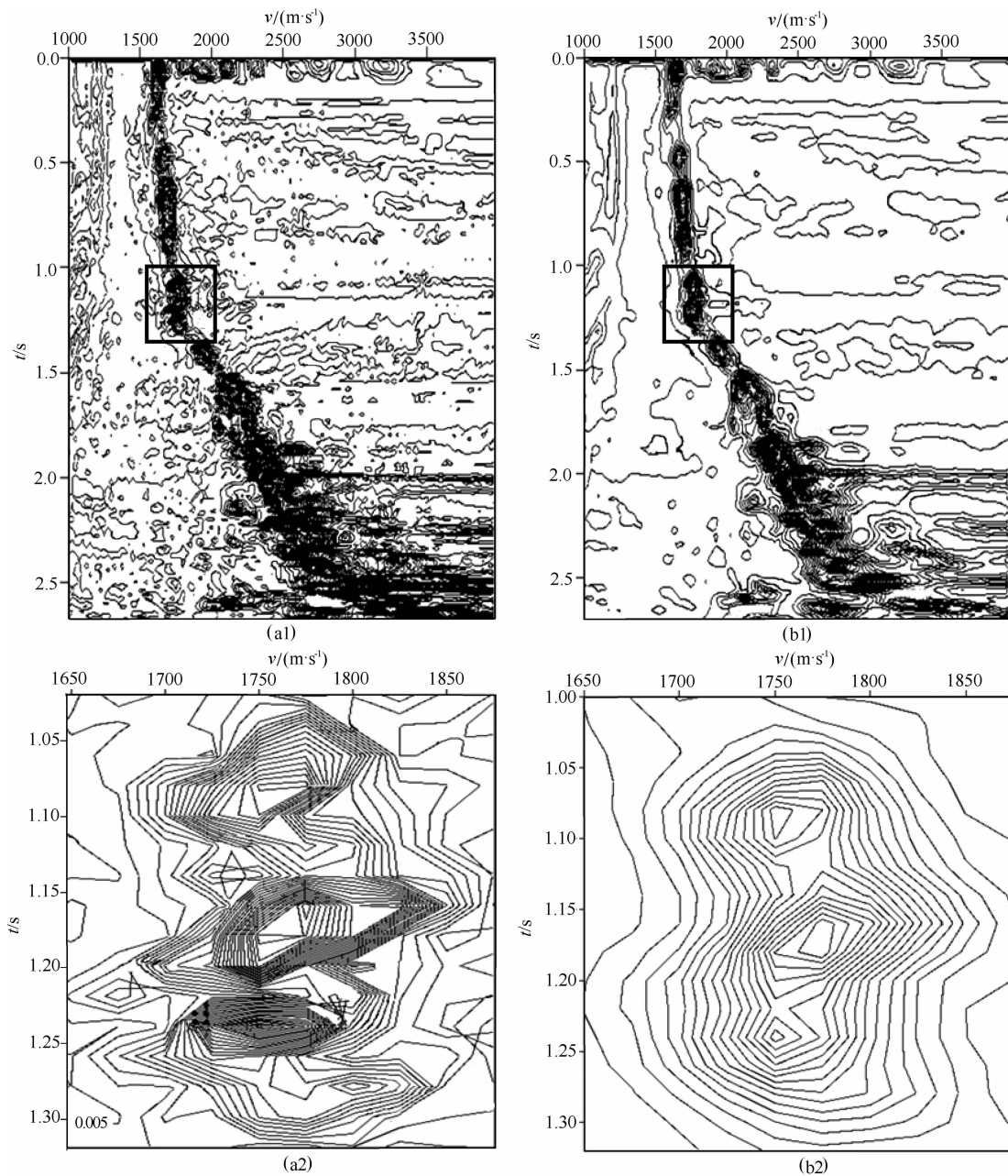


图 5 由图 4 速度模型得到的相似度速度谱(CMP100)光顺处理前后比较图

(a1)常规相似度速度谱;(b1)经过光顺处理的速度谱;(a2和 b2)分别为(a1)和(b1)中局部(小方框内)的速度谱.

Fig. 5 Comparison on the semblance velocity spectrum(CMP100), before and after fairing, acquired from the velocity model (Fig. 4)

(a1) Shows a regular semblance velocity spectrum; (b1) Shows the one filtered by weighted mean from (a1); (a2) and (b2) show the local velocity spectrum correspondent to the smaller block diagram.

为对速度谱进行光顺处理后再利用 Viterbi 算法拾取速度并做动校正叠加的结果,不难看出,相比于图 6a,图 6b 中 A、B、C、D 所指示的同相轴明显得到了很好的增强.这个例子所得到的结果再次说明光顺处理对于常规速度分析中速度的自动拾取起到了良好的作用.

自动拾取除了希望获得优质的成像外,还有一个促使我们实现自动拾取的原因,那就是降低处理成本的问题,亦即提高处理效率.对于用图 1 或图 4 的速度模型进行光顺处理和优化自动拾取并最终得到如图 3c 或图 6b 的结果,在所有 CMP 点都参与分析的情况下也仅需几秒钟,这个对于手工拾取而言

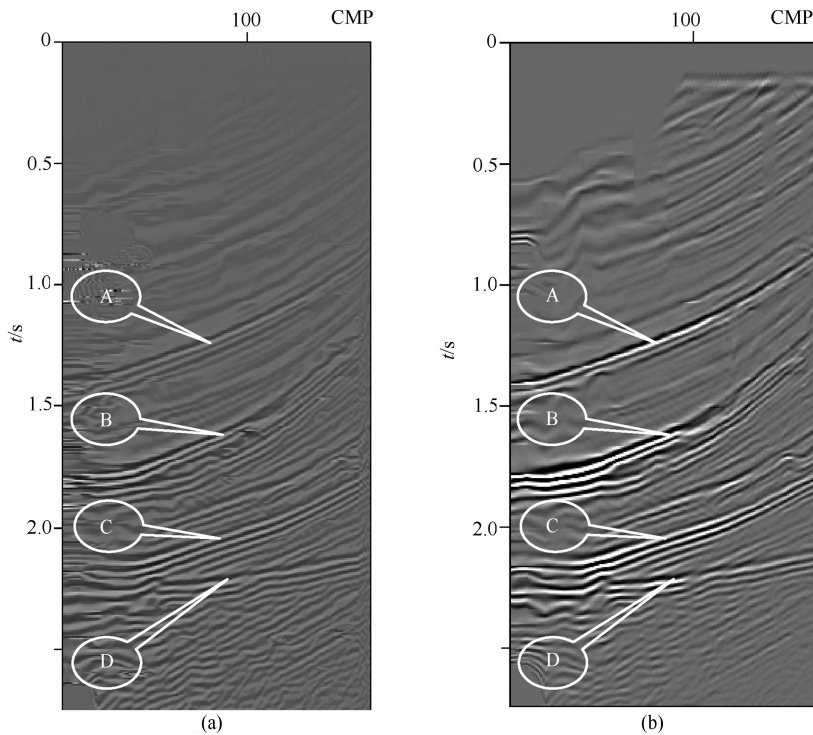


图 6 利用 Viterbi 算法自动拾取图 5 中不同速度并做水平叠加的剖面图比较
(a)未进行光顺处理所拾取速度叠加的结果;(b)光顺处理后所拾取速度叠加的结果。

Fig. 6 Comparison on the profile stacking from the different velocity, in figure 5, auto-picked by the Viterbi algorithm
(a) Shows a staking profile from the unsmoothed velocity spectrum; (b) Shows the result from the smoothed one.

是远远达不到的。

5 结 论

从文中的讨论看,我们不难看出:若不对原始速度谱(所定义函数)进行光顺处理(函数的再定义),就有可能得不到好的源数据(高分辨率速度谱),也就可能得不到可靠的速度信息;而若没有具有快速搜寻最优解功能的 Viterbi 算法的参与,就不能实现速度的自动拾取.因此说,光顺处理技术与路径积分优化法的有机结合才形成了一个有效的具有获取高精确解的速度自动拾取功能的方法。

实现速度的自动拾取,意味着速度分析效率的提高,也就意味着我们在进行地震数据处理时可做更多、更有效、更充分的分析工作,亦即在速度分析中,我们就可以进行更多点(CMP),甚至进行全部点的速度分析以更多地获取速度信息,这对于减少可能的经济损失(由于高昂的计算代价而在速度分析中可能仅做部分速度信息的拾取致使丢失有效地质信息所带来的经济损失),降低勘探成本,提高生产效率,具有积极的意义。

本文讨论了将自动拾取方法应用于简单或较简

单模型试算结果,得到了较好的结果,为进一步开展复杂地质体相关研究奠定了基础.但如何应用于解决复杂地质体的速度拾取,相关研究有待于进一步的深入.此外,本文为了说明光顺处理对于改善速度谱质量的作用,仅应用了加权均值滤波法,若应用其它相关算法做光顺处理会获得不同,或许是更好的效果,相关研究有待深入探讨。

参考文献(References)

- [1] Toldi J. Velocity analysis without picking[Ph. D. Thesis]. Stanford; Stanford University, 1985.
- [2] Zhang L, Claerbout J. Automatic dip-picking by non-linear optimization. *SEP*(67), 1990: 123-138.
- [3] 陈志德,刘振宽,李成斌. 三维叠前深度偏移速度分析及蒙特卡洛自动层速度拾取. *地球物理学报*, 2002, 45(2): 246-254.
Chen Z D, Liu Z K, Li C B. 3-D Pre-stack depth migration velocity analysis and automatic monte carlo velocity picking in depth. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, 45(2): 246-254.
- [4] McElice R J. *The Theory of Information and Coding*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1977.
- [5] Yoshua B. *Markovian Models for Sequential Data*[EB/OL]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.>

1. 1. 40. 5337. 1996-10-22.
- [6] Méndez L A T. Viterbi Algorithm in Text Recognition: Term project for course; 308-644B. Montreal: McGill University, 1998.
- [7] Zhang L. Automatic picking and its applications. *SEP(70)*, 1990; 275-292.
- [8] 林年添, 刘洪, 李建勇. 基于 Viterbi 算法的复杂地质体速度约束化自动拾取. *地球物理学进展*, 2004, 19(2): 311-316.
Lin N T, Liu H, Li J Y. Automatic picking velocity by the viterbi algorithm for the complex geological case. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2004, 19(2): 311-316.
- [9] Pérez-Arribas F, Suárez-Suárez J A, Fernández-Jambrina L. Automatic surface modelling of a ship hull. *Computer Aided Design*, 2006, 38(6): 584-594.
- [10] 李学艺, 姜虹, 陈松等. 基于马尔可夫随机场的曲面光顺算法. *西安交通大学学报*, 2003, 37(3): 241-244.
Li X Y, Jiang H, Chen S, et al. Surface fairing algorithm based on Markov random fields. *Journal of Xi'an Jiaotong University* (in Chinese), 2003, 37(3): 241-244.
- [11] Sariöz E. An optimization approach for fairing of ship hull forms. *Ocean Engineering*, 2006, 33(16): 2105-2118.
- [12] 林年添, 柴慧婵, 魏立杰等. 速度谱曲面的光顺处理及其作用. *地球物理学进展*, 2011, 26(3): 311-316.
Lin N T, Chai H C, Wei L J, et al. Surface fairing with its action on the Velocity Spectrum. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2011, 26(3): 311-316.
- [13] 杨长春, 倪彤光. 一种高效的混合曲面光顺算法. *计算机应用*, 2005, 25(11): 2609-2611.
Yang C C, Ni T G. Efficient hybrid algorithm for mesh smoothing of surfaces. *Journal of Computer Applications* (in Chinese), 2005, 25(11): 2609-2611.
- [14] Luo X N, Liu N, Gao C Y. Fairing geometric modeling based on 4-point interpolatory subdivision scheme. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2004, 163(1): 189-197.
- [15] Zhang C N, Zhang P F, Cheng F H. Fairing spline curves and surfaces by minimizing energy. *Computer-Aided Design*, 2001, 33(13): 913-923.
- [16] 甘屹, 齐从谦, 陈亚洲. 基于遗传算法的曲线曲面光顺. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2002, 30(3): 322-325, 334.
Gan Y, Qi C Q, Chen Y Z. Smoothing of curves and surfaces based on genetic algorithm. *Journal of Tongji University (Natural Science)* (in Chinese), 2002, 30(3): 322-325, 334.
- [17] Renka J R. Constructing fair curves and surfaces with a Sobolev gradient method. *Computer Aided Geometric Design*, 2004, 21(2): 137-149.
- [18] Xu G L. Surface fairing and featuring by mean curvature motions. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2004, 163(1): 295-309.
- [19] 林年添. 保重心脉冲压缩滤波及其在速度自动拾取中的应用 [博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.
Lin N T. Automatic Picking Velocity by Gravity Center Preserved Pulse Compressed Filter and the Viterbi Algorithm [Ph. D. Thesis] (in Chinese). Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [20] Taner M T, Koehler F, Sheriff R E. Complex seismic trace analysis. *Geophysics*, 1979, 44(6): 1041-1063.

(本文编辑 汪海英)