

基于确定性道重排法的非双曲线走时速度 及等效各向异性参数分析

任岩^{1,2,†} 刘志鹏¹ 李世林¹

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; † E-mail: renyan2012@foxmail.com

摘要 使用标准相似系数算子计算速度谱和等效各向异性参数谱时, 谱上会出现能量团的拖尾现象, 谱横向分辨率低, 给准确拾取参数带来困难。针对这一问题, 引入基于确定性道重排的微分相似系数算子, 将归一化微分相似系数及确定性道重排法相结合, 利用微分算子中的做差运算对地震道间时差的敏感性, 放大相干算子, 提高谱分辨率。将该方法应用于非双曲型走时等效各向异性参数分析, 通过对模型及实际数据的测试, 得到分辨率较高的速度谱和等效各向异性参数谱, 且分辨率明显优于标准相似系数法。

关键词 确定性道重排; 微分相似系数; 非双曲走时; 等效各向异性参数; 高阶速度分析

中图分类号 P315

Velocity and Effective Anisotropic Parameter Analysis Using Nonhyperbolic Traveltime Based on Deterministic Trace Resorting Method

REN Yan^{1,2,†}, LIU Zhipeng¹, LI Shilin¹

1. School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083; † E-mail: renyan2012@foxmail.com

Abstract The lower lateral spectral resolution is caused by the divergence of energy clots in the velocity and effective anisotropic parameter spectra when standard semblance operator is used. To solve the problem, the deterministic trace resorting differential semblance operator is introduced. By resorting the seismic traces, the differential semblance operator is sensitive to the moveout between the adjacent seismic traces, which maximize the spectral resolution. This method could be firstly applied to effective anisotropic parameter analysis using nonhyperbolic traveltime. The synthetic and field data examples are introduced to testify the efficiency of the new method, and the results confirm that spectral resolution increases a lot compared with standard semblance method.

Key words deterministic trace resorting; differential semblance; nonhyperbolic traveltime; effective anisotropic parameter; high order velocity analysis

速度分析是油气地震勘探资料处理中的一个重要环节, 地震波速度参数也贯穿地震数据采集、处理和解释的整个过程^[1-3]。速度分析的质量直接影响动、静校正, 继而影响叠加结果和偏移成像, 再影响到时深转换、地层压力预测及岩性与储层刻画等^[2,4-5]。因此, 地震波速度是地震勘探中最重要的参数之一。在地震勘探发展的早期阶段, 当地质构造较为简单时, 基于双曲线时距方程的叠加速度分

析技术就能满足要求^[1,6]。随着勘探条件的日益复杂和成像技术的逐渐成熟, 需要考虑地下介质的非均匀性和各向异性, 因而使用高阶非双曲线走时近似式, 在获得准确速度信息的同时, 求取相应的等效各向异性参数, 以满足后续高阶动校正、叠加及各向异性偏移成像等处理方法的需要^[7-8]。但是, 在地震资料信噪比较低、地震地质条件复杂的地区, 地震波传播情况复杂, 常规相似系数算法计算

的速度谱和各向异性参数谱上的能量团不能很好地聚焦,对准确拾取地层参数信息、获得良好的后续处理效果增加了难度。

确定性道重排法是自举统计法在地震数据道集上的一种应用,是将原始地震道集按照某种确定性方法重新排序。本文利用确定性道重排方法处理原始地震数据,在常规相似系数法的基础上,利用微分相似系数算子对地震道间时差的敏感性,使得相干算子最大化,提高谱横向分辨率。本文首次将该方法应用于非双曲型走时速度及等效各向异性参数分析。通过对模型数据和实际地震资料的应用,验证了方法的可靠性。

1 方法原理

目前最常用的速度及等效各向异性参数分析方法,是在共中心点(common middle point, CMP)道集上,根据非双曲型走时曲线,对每个采样时间构建一个时窗,在时窗内扫描不同试验速度或各向异性参数,以完成动校正,并计算相似系数,再根据相似系数是否最大,判定该时刻的最佳试验参数。利用相似系数方法得到的参数谱上存在比较明显的能量团拖尾现象,横向分辨率不足。Symes 等^[9]提出归一化微分相似系数法,使谱分辨率得到一定程度的改善。Chauris 等^[10]详细阐述了微分相似系数法相较于常规相似系数法的优点。针对微分相似系数法的特点,用确定性道重排的方法重新排列地震数据,最大化相干算子,可有效解决能量团发散现象。等效各向异性参数谱的精度在很大程度上受速度准确性的影响,分辨率较低。本文将道重排微分相似系数法用于求取等效各向异性参数,大大提高了等效各向异性参数谱的横向分辨率。

1.1 相似系数法

各向异性介质双参数或多参数扫描速度分析,是根据 CMP 道集非双曲线走时(式(1))在所有的采样时间 t_0 和偏移距 X 上扫描均方根速度 v 以及等效各向异性(简称各向异性)参数 η , 分别计算相似系数 S (式(2))^[11-15], 形成均方根速度谱和各向异性参数谱,其中相似系数 S 最大时可判定为某 t_0 时刻的最佳均方根速度和最佳各向异性参数。对于式(1)表示的双参数非双曲走时曲线,可以先根据中-近偏移距数据,只利用等号右侧前两项,对均方根速度进行扫描,计算相似系数速度谱,并且在速度谱上拾取相似系数极值点,得到地层均方根速度 v ,

然后将得到的均方根速度代入式(1),利用全偏移距数据,计算相似系数各向异性参数谱,从而拾取 η 参数^[16-22]。

$$t^2(X) = t_0^2 + \frac{X^2}{v^2} - \frac{2\eta X^4}{v^2 [t_0^2 v^2 + (1 + 2\eta) X^2]}, \quad (1)$$

$$S = \frac{\sum_{t_0-\lambda/2}^{t_0+\lambda/2} \left[\sum_{i=1}^N d(t, x_i) \right]^2}{N \sum_{t_0-\lambda/2}^{t_0+\lambda/2} \sum_{i=1}^N d(t, x_i)^2}, \quad (2)$$

式(1)和(2)中, t_0 为零偏移距时间, X 为偏移距, N 为总道数, λ 为时窗宽度, $d(t, x_i)$ 代表动校正后的 t 时间点、偏移距 x_i 处的振幅, S 的取值范围是 $[0, 1]$ 。式(2)所表示的标准相似系数计算方法,无论是常规双曲速度分析,还是多参数非双曲各向异性速度分析,都是目前商业软件中使用最多的谱计算方法。但是,在实际处理过程中,当噪音较强或地震波传播情况复杂时,相似系数谱的聚焦性不理想,谱上会有较明显的拖尾现象,并且,当对数据做远偏移距切除后,从速度谱上很难得到准确的速度参数,进而很难得到高分辨率的各向异性参数谱。

1.2 归一化微分相似系数法

通过分析常规相似系数计算式(式(2))可知,等式右边分子分母均为求和项,没有减法项,道集上集中的噪音也可产生较高的相似系数,会在谱上形成聚焦点周围的拖尾现象,即该方法的抗干扰能力较弱。归一化微分相似系数(normalized differential semblance)算子可以在一定程度上改善这一问题,表达式为

$$\text{NDS} = (1 - D)S, \quad (3)$$

其中, S 是式(2)表示的相似系数, D 是由式(4)定义的归一化微分相似系数:

$$D = \frac{N \sum_{t_0-\lambda/2}^{t_0+\lambda/2} \sum_{i=2}^N [d(t, x_i) - d(t, x_{i-1})]^2}{4(N-1) \sum_{t_0-\lambda/2}^{t_0+\lambda/2} \sum_{i=1}^N d(t, x_i)^2}, \quad (4)$$

其中, t_0 为零偏移距时间, N 为总道数, λ 为时窗宽度, $d(t, x_i)$ 代表动校正后 t 时间点、偏移距 x_i 处的振幅, D 的取值范围是 $[0, 1]$, 即 NDS 的取值范围也是 $[0, 1]$ 。从式(4)可以看出,等号右边的分子是道集中相邻两道做差后的平方求和。当扫描参数正好与

地层实际参数一致时,动校正将地震道集校平,前后两道差异很小,导致 D 很小,进而算子 NDS 更趋近 1,可以将该扫描参数值更明显地体现在参数谱上^[9-10,23-24]。

图 1 为使用归一化微分相似系数法计算速度谱的实例。图 1(a)为合成数据 CMP 道集,图 1(b)为常规相似系数法计算的速度谱 S ,图 1(c)为算子 $1 - D$ 得到的谱,图 1(d)为使用归一化微分相似系数法计算的速度谱 NDS ,是图 1(b)与(c)的乘积结果。与常规相似系数法相比,使用归一化微分相似系数法求得的速度谱横向分辨率有一定提高,比如在 0.8 s 处的能量团拖尾现象得到一定改善。

1.3 归一化道重排微分相似系数法

通过前面对常规相似系数和归一化微分相似系数的讨论可知,后者对参数扫描中正确的扫描值更为敏感,这是因为其分子中包含的做差计算很好地限制了所扫描参数的数值对动校正结果的影响,一旦扫描数值是最佳数值, D 就会得到最小值,相应的 NDS 算子结果最大。然而,动校正后相邻两道的时差一般较小,不能很好地体现做差计算带来的明显效果。因此,本文使用道重排方法,对数据进行重新排序。

道重排法(Trace Resorting)是自举法(Bootstrap)在地震数据道集上的应用。自举法是 Efron^[25]提出的一种逼近复杂统计量估计值分布的通用方法,是一种对输入数据进行重采样来估计均值、方差及置信区间等刻画数据统计属性的统计学推理方法。自举法通过对输入数据进行随机排序,生成具有不同统计属性但长度相同的新数据集,并且不需要数据样本点以外的信息^[26]。自举法重组数据分为两种:1)从输入数据中随机抽取一个样点后再做放回操作,即每次随机抽取时的样本数量相同,输出结果中存在重复样点,对于一个长度为 n 的序列 x ,可得到的新序列 \bar{x} 总数为 n^n ; 2)从输入数据中随机抽取一个样点后不放回,下一次抽取不会得到与之前抽取相同的样点,不会出现任何重复现象,对于一个具有 n 个样点的序列 x ,可得到的新序列 \bar{x} 总数为 $n!$ ^[27-28]。显然,对于速度及各向异性参数分析,应使用第 2 种自举操作来进行道重排。

归一化道重排微分相似系数(normalized trace resorting differential semblance)算子表示为

$$NTRDS = (1 - \bar{D})S, \quad (5)$$

式中, S 仍然是式(2)定义的标准相似系数, \bar{D} 是由式(6)定义的归一化道重排微分相似系数:

$$\bar{D} = \frac{N \sum_{t_0-\lambda/2}^{t_0+\lambda/2} \sum_{t=2}^N [d(t, \bar{x}_i) - d(t, \bar{x}_{i-1})]^2}{4(N-1) \sum_{t_0-\lambda/2}^{t_0+\lambda/2} \sum_{i=1}^N d(t, \bar{x}_i)^2}, \quad (6)$$

其中, t_0 为零偏移距时间, N 为总道数, λ 为时窗宽度, $d(t, \bar{x}_i)$ 为动校正后经过道重排操作后 t 时间点、偏移距 \bar{x}_i 处的振幅^[27-29]。

应用最佳扫描参数得到的动校正结果一般为一条水平同相轴,此时 \bar{D} 值最小, S 值最大,算子 $NTRDS$ 最大并得到加强。这种方法可以削弱时窗内较强噪音产生的高相似系数,从而提高谱横向分辨率。

\bar{D} 与 S 的变化范围均为 $[0, 1]$, 因此 $NTRDS$ 的变化范围为 $[0, 1]$ 。因为加法是可交换的,所以使用道重排法并不会改变相似系数 S , 而式(6)分子中的减法项对地震道集的排序非常敏感,所以对于式(5)来说,道重排法得到的每个输出道集都会产生不同的 $NTRDS$ 值。

对于道重排法,又有不同的抽样排列方式,包括一般随机道重排、确定性道重排和可控随机道重排。一般随机道重排即将地震道集随机排序,得到输出道集。确定性道重排是交换原来按增序排列的地震道集内远近偏移距道的顺序,确保在新的输出道集中两两连续相邻道间存在显著时差。假定一条道数为 $N=2m$ 的道集 x , 经过确定性道重排后的输出道集 \bar{x} 为 $[x_1, x_{m+1}, x_2, x_{m+2}, \dots, x_k, x_{m+k}, \dots, x_m, x_N]$ 。另外,可控随机道重排的做法为对道集内奇数道和偶数道分别进行随机排序。确定性道重排可以确保输出道集相邻道间存在明显时差,而其他两种随机道重排法的输出结果均不可预测,不能保证输出道集具有上述特征。

图 2 为不同排序方法的道重排实例。图 2(a)时窗内为一条经过初步动校正后按增序排列并含有少量剩余动校正量的输入道集,图 2(b)~(d)分别为输入道集利用一般随机道重排、确定性道重排和可控随机道重排方法得到的输出道集。根据前面描述,图 2(b)方法得到的 $NTRDS$ 值一定大于或等于图 2(a)计算的 NDS 值,而图 2(c)确定性道重排对于时间漂移的识别比图 2(b)和(d)随机性道重排效果更

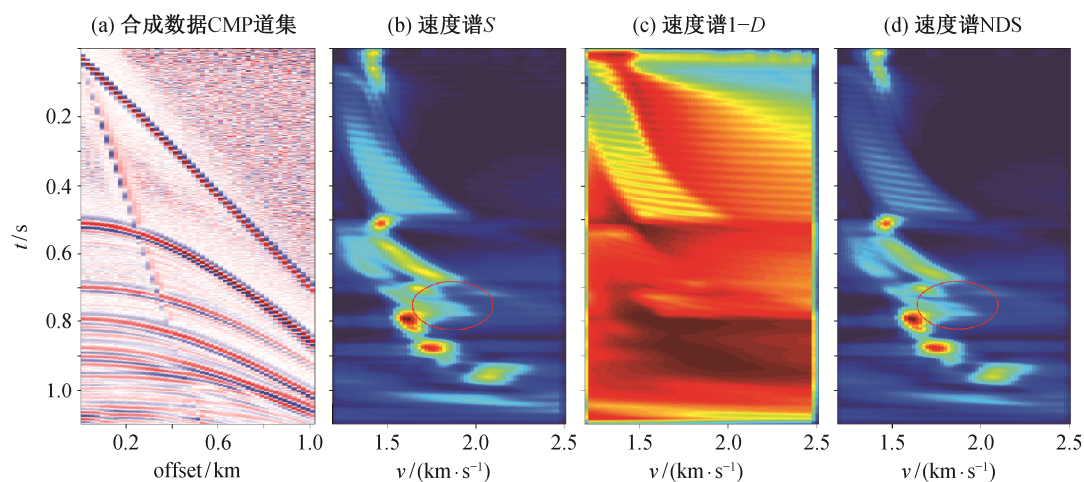


图 1 归一化微分相似系数法实例
Fig. 1 Examples of NDS coefficient

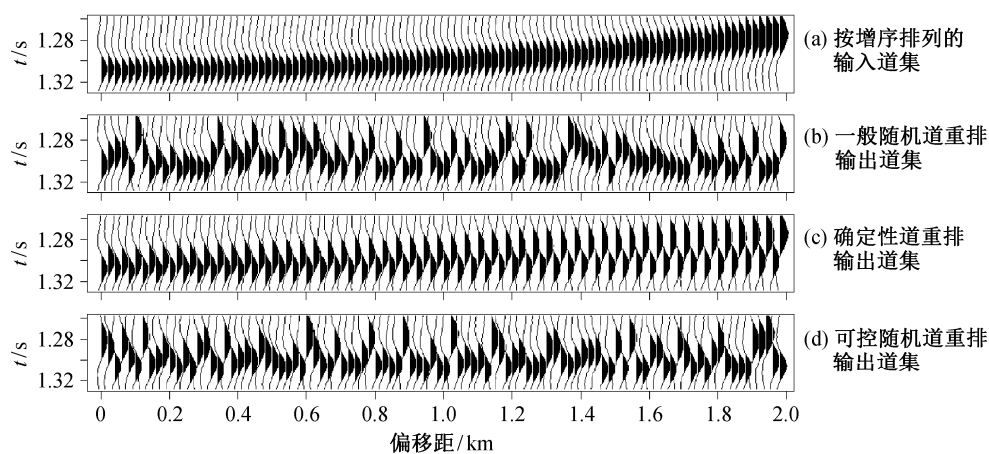


图 2 不同排序方法的道重排输出实例
Fig. 2 Examples of different trace resorting method

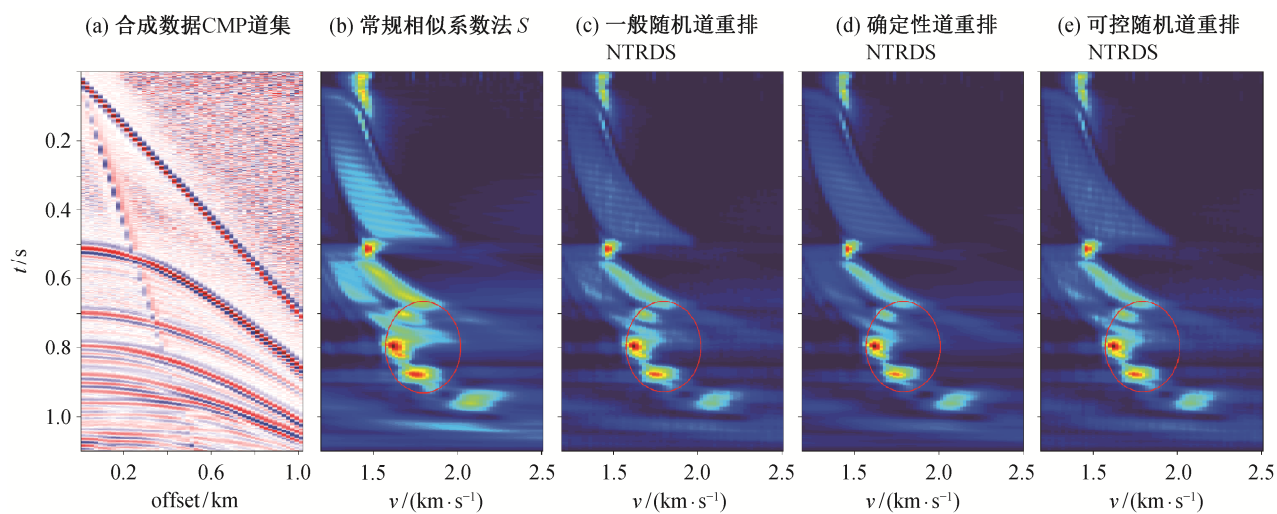


图 3 归一化道重排微分相似系数法速度谱实例
Fig. 3 Examples of NTRDS coefficient velocity spectra

好,因此用图 2(c)方法计算的 NTRDS 值分辨率会更高。

图 3 为分别使用常规相似系数法及 3 种道重排微分相似系数法求得的速度谱。从图 3 可以看出,与常规相似系数法相比,使用道重排微分相似系数法求得的速度谱的横向分辨率有较明显的提高,能量团聚聚焦性更好。为定量比较谱分辨率,画出图 3(b)~(c)中 0.96 s 处的归一化后的谱剖面,如图 4 所示,并引入谱分辨率的概念,如图 5 所示,即

$$R = \frac{\Delta h_{1/2}}{h_0}, \quad (7)$$

其中, $\Delta h_{1/2}$ 为半极值点对应的参数间隔, h_0 为极值点对应的参数值,这里 R 越小,谱分辨率越高,并且 R 的数值大小仅可用于判断同种参数的谱分辨率相对大小。

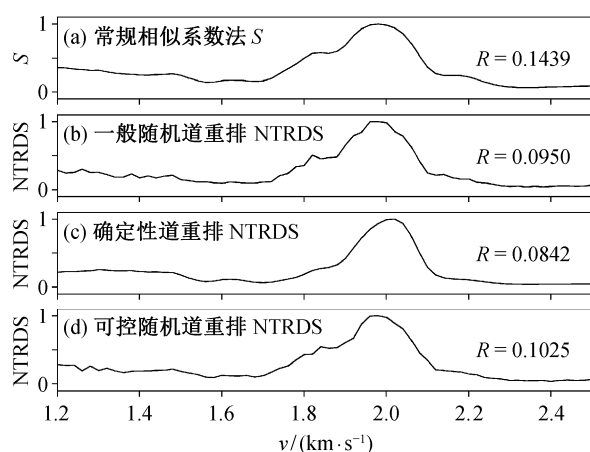


图 4 归一化道重排微分相似系数法 0.96 s 处速度谱剖面
Fig. 4 Velocity spectra profiles at 0.96 s using NTRDS coefficient

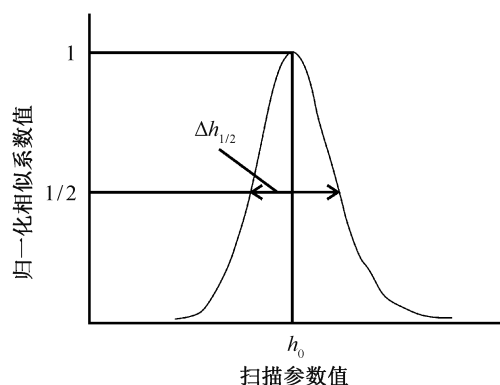


图 5 谱分辨率计算示意图

Fig. 5 Schematic diagram of spectral resolution calculation

通过观察图 3 可知,图 3(d)所示的谱能量团聚聚焦性最好。同时,图 4 给出定量化的谱分辨率数值。经过综合分析得出,确定性道重排微分相似系数法的谱分辨率最高。因此,下面的讨论均使用确定性道重排方法。

1.4 高分辨率归一化确定性道重排微分相似系数

在式(5)中多次使用确定性道重排操作,可以使该式得到的谱分辨率进一步提高。高分辨率归一化确定性道重排微分相似系数(normalized deterministic trace resorting differential semblance)算子可定义如下:

$$\text{NDTRDS}_r = (1 - \bar{D}_1)(1 - \bar{D}_2) \dots (1 - \bar{D}_r)S, \quad (8)$$

$\bar{D}_i (i = 1, 2, \dots, r)$ 为第 i 个确定性道重排输出道集的归一化微分相似系数, S 仍为式(2)定义的常规相似系数。算子 NDTRDS_r 的变化范围也是 $[0, 1]$, 得到的谱分辨率会随着使用道重排输出数量的增加而提高(图 6 和 7), 但运算时间也会相应地增加。

2 实际资料速度及各向异性参数谱计算

在用确定性道重排微分相似系数法求取速度参数, 得到较好效果之后, 本文也将该方法用于等效各向异性参数的求取。在对实际地震资料的验证中, 获得较常规相似系数法更好的结果, 说明本文方法在各向异性参数谱的求取中应用效果良好, 可在实际生产中使用。

图 8(a)是美国科罗拉多矿业学院波场处理中心(<http://www.cwp.mines.edu/cwpcodes/data/>)给出的国外某浅海实际地震资料的一个 CMP 道集。该 CMP 道集共有 60 道, 道间距 50 m, 采样间隔 4 ms, 记录长度 4000 ms, 最小偏移距 262 m, 最大偏移距 3212 m。该数据多次波非常发育, 因此预先做了预测反褶积与拉动变换消除多次波的处理。图 8(b)是常规相似系数法求得的速度谱, 深层能量团聚聚焦性较差, 分辨率较低。图 8(c)~(e)分别为 $r = 1, 2, 3$ 时的高分辨率归一化确定性道重排微分相似系数速度谱 NDTRDS_r , 显示在很大程度上改善了深层能量团发散的问题, 并且, 当道重排输出数量增加时, 聚焦性随之增加。

图 9 是速度谱上对应 3.36 s 处的相似系数谱剖

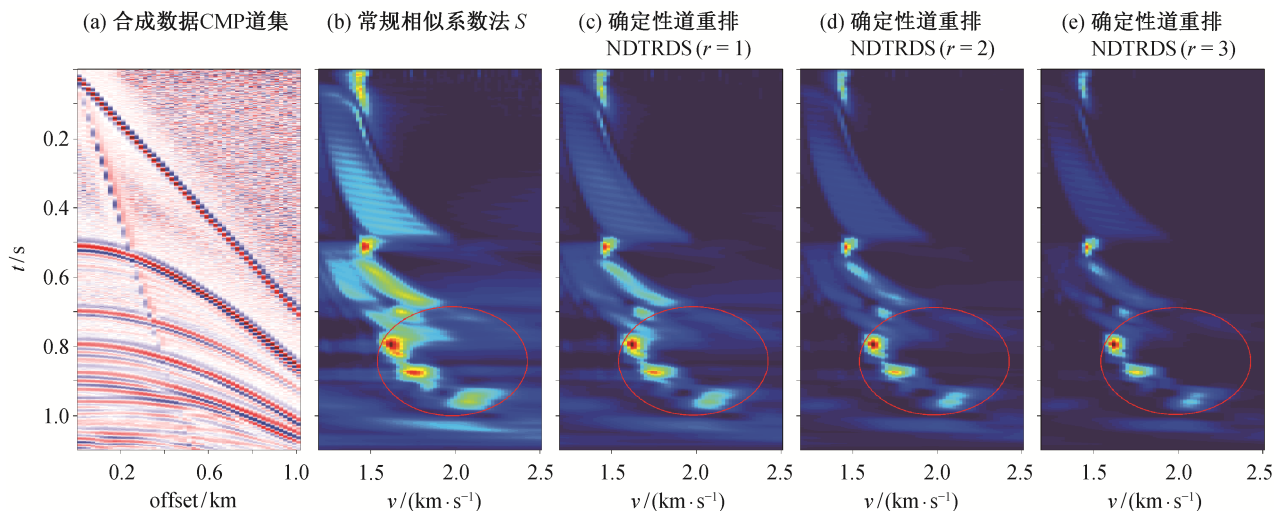


图 6 高分辨率归一化确定性道重排微分相似系数法速度谱 ($r = 1, 2, 3$)
Fig. 6 High-resolution NDTRDS coefficient velocity spectra with $r = 1, 2, 3$

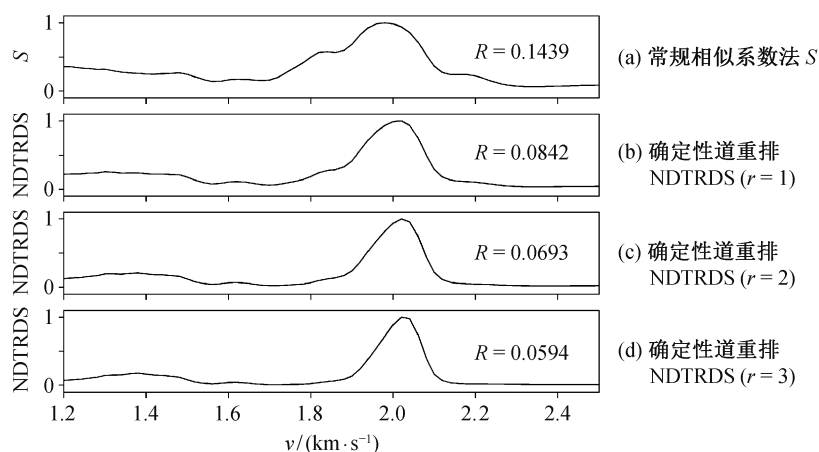


图 7 高分辨率归一化确定性道重排微分相似系数法 0.96 s 处速度谱剖面 ($r = 1, 2, 3$)
Fig. 7 Velocity spectra profiles at 0.96 s using NDTRDS coefficient with $r = 1, 2, 3$

面及谱分辨率。图 9(a)对应常规相似系数法, 图 9(b)~(d)分别对应 $r = 1, 2, 3$ 时的高分辨率归一化确定性道重排微分相似系数法。从剖面形态及谱分辨率定量结果可知, 与常规相似系数法相比, 确定性道重排微分相似系数法的分辨率较高, 且随着道重排输出数量的增加而增加。

使用均方根速度对原始 CMP 道集做初步动校正后, 在具有剩余动校正量的 CMP 道集上, 应用本文提出的确定性道重排微分相似系数法, 计算式 (1) 中的等效各向异性参数 η 谱。如图 10 所示, 图 10(a)为含有剩余动校正量的 CMP 道集; 图 10(b)为常规相似系数法等效各向异性参数谱, 可以看出

中深层能量团聚焦性非常差, 严重影响参数拾取; 图 10(c)~(e)分别为 $r = 1, 3, 6$ 时的高分辨率归一化确定性道重排微分相似系数各向异性参数谱 NDTRDS _{η} , 可以看出, 当 $r = 1$ 时, 本文方法求得各向异性参数谱的能量团聚焦性有所改善, 但中深层仍然较差, 当 $r = 6$ 时, 能量团聚焦性有非常明显的改善。

图 11 是各向异性参数谱上对应 2.42 s 处的相似系数谱剖面及谱分辨率。图 11(a)对应常规相似系数法, 图 11(b)~(d)分别对应 $r = 1, 3, 6$ 时的高分辨率归一化确定性道重排微分相似系数法。从图 11 可以明显地看出, 常规相似系数法的各向异性参

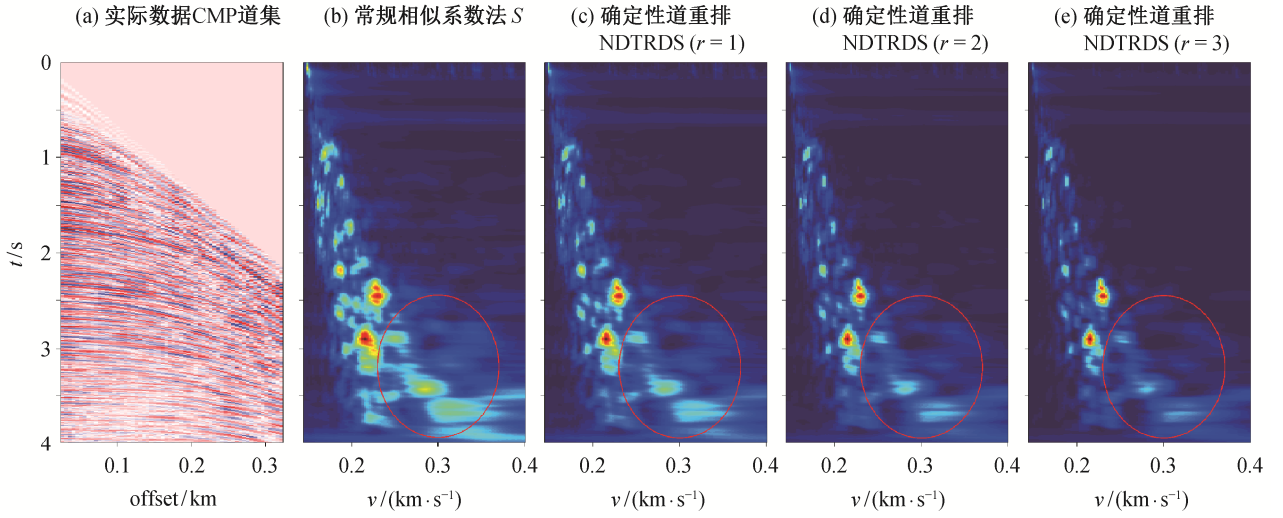

 图 8 实际数据高分率归一化确定性道重排微分相似系数法速度谱 ($r = 1, 2, 3$)

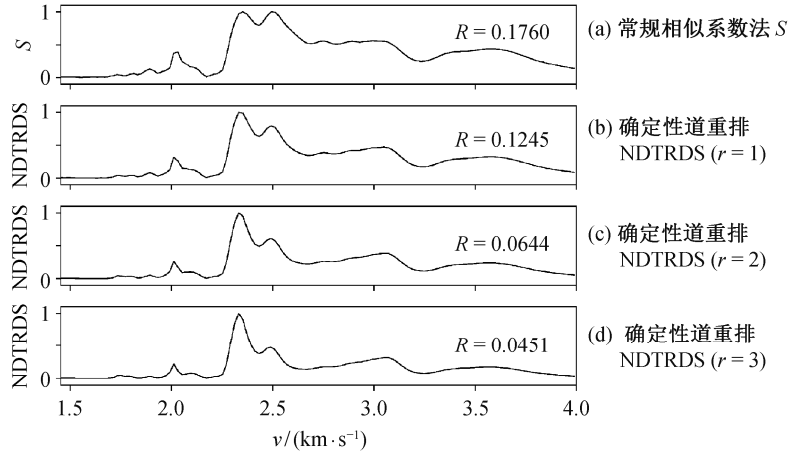
 Fig. 8 Velocity spectra of field data using high-resolution NDTRDS coefficient with $r = 1, 2, 3$

 图 9 实际数据高分率归一化确定性道重排微分相似系数法 3.36 s 处速度谱剖面 ($r = 1, 2, 3$)

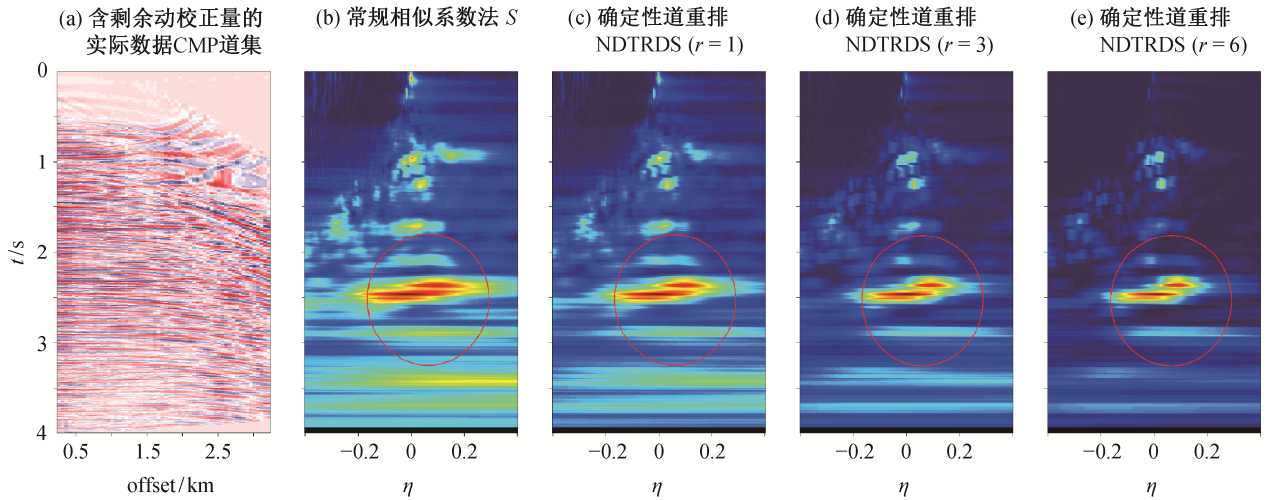
 Fig. 9 Velocity spectra profiles of field data at 3.36 s using high-resolution NDTRDS coefficient with $r = 1, 2, 3$

 图 10 实际数据高分率归一化确定性道重排微分相似系数法各向异性参数谱 ($r = 1, 3, 6$)

 Fig. 10 Anisotropy parameter spectra of field data using high-resolution NDTRDS coefficient with $r = 1, 3, 6$

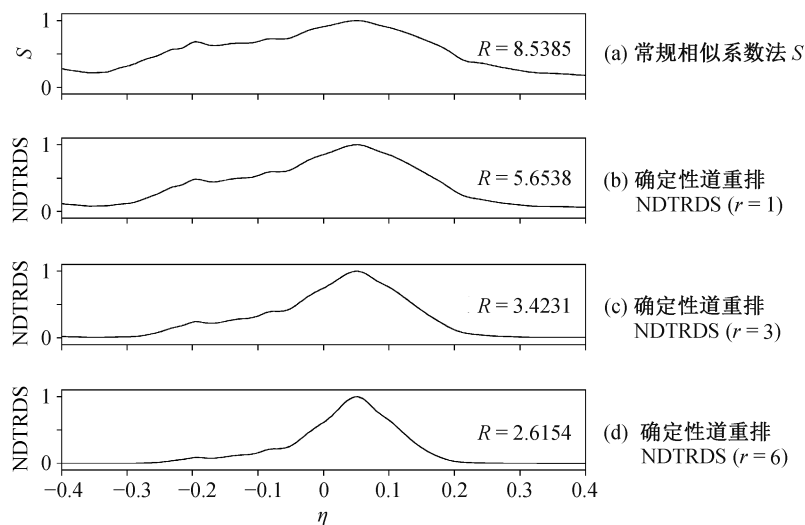


图 11 实际数据高分辨率归一化确定性道重排微分相似系数法 2.42 s 处各向异性参数谱剖面 ($r = 1, 3, 6$)

Fig. 11 Anisotropy parameter spectra profiles of field data at 2.42 s using high-resolution NDRDS coefficient with $r = 1, 3, 6$

数谱分辨率非常低,使用本文方法后谱分辨率升高,并且,当道重排数量增加时,各向异性参数谱分辨率也持续上升。

3 结论

本文通过讨论微分相似系数法对地震道排序的敏感性,参考统计学中的自举法,将地震道集重新排列,最大化相干算子,以达到提高谱横向分辨率的目的。应用本文方法,改善了速度谱的计算结果,并首次将该方法应用于等效各向异性参数谱的求取中。通过模型和实际数据试算,表明了该方法的有效性和实用性。综合分析,可以得出以下几点结论。

1) 通过比较一般随机道重排、确定性道重排和可控随机道重排 3 种方法,可知确定性道重排能够保证输出道集两两道间存在明显时差,从而使微分相似系数法得到的谱分辨率最高,而另外两种道重排方法输出结果不可预测。

2) 确定性道重排结合微分相似系数算法,可以在很大程度上提高谱分辨率,有利于参数拾取。本文验证了该方法对等效各向异性参数谱求取的适用性,能够极大改善等效各向异性参数谱分辨率低的问题。

3) 在实际应用中,该方法的使用是数据驱动的,应针对地震数据质量,合理选择确定性道重排的输出数量,均衡分辨率和运算时间,达到质量与效率较好的结合。

参考文献

- [1] Taner M T, Koehler F. Velocity spectra: digital computer derivation and application of velocity functions. *Geophysics*, 1969, 34(6): 859–881
- [2] 潘宏勋, 方伍宝. 地震速度分析方法综述. *勘探地球物理进展*, 2006, 29(5): 305–311
- [3] 张军华, 张瑞芳, 王静, 等. 高密度资料面元细分与速度分析关系研究. *地球物理学进展*, 2009, 24(6): 2079–2086
- [4] 郭树祥, 韩永治, 李建明, 等. 高分辨率地震资料处理中的优化速度分析方法. *石油物探*, 2004, 43(1): 80–82
- [5] 倪冬梅, 韩立国, 宁媛丽, 等. 双谱速度分析下的地层压力预测. *世界地质*, 2011, 30(4): 648–654
- [6] Toldi J L. Velocity analysis without picking. *Geophysics*, 1989, 54(2): 191–199
- [7] Sarkar D, Tsvankin I. Migration velocity analysis in factorized VTI media. *Geophysics*, 2004, 69(3): 708–718
- [8] 井涌泉, 樊鹏军, 谭卓, 等. VTI 介质各向异性叠前时间偏移方法. *中国海上油气*, 2014, 26(5): 36–41
- [9] Symes W W, Carazzone J J. Velocity inversion by differential semblance optimization. *Geophysics*, 1991, 56(5): 654–663
- [10] Chauris H, Noble M. Two-dimensional velocity macro model estimation from seismic reflection data by local differential semblance optimization: applica-

- tions to synthetic and real data sets. *Geophysical Journal International*, 2001, 144(1): 14–26
- [11] Neidell N S, Taner M T. Semblance and other coherency measures for multichannel data. *Geophysics*, 1971, 36(3): 482–497
- [12] Cunningham A B, Heffring H H. Interpretation of velocity spectra. *Geophysics*, 1980, 45(12): 1741–1752
- [13] 张军华, 王静, 郑旭刚, 等. 关于几种速度分析方法的讨论及效果分析. *石油物探*, 2009, 48(4): 347–353
- [14] Tognarelli A, Stucchi E, Ravasio A, et al. High-resolution coherency functionals for velocity analysis: an application for subbasalt seismic exploration. *Geophysics*, 2013, 78(5): 53–63
- [15] 郭树祥. 一种优化数据量以提高地震速度分析精度的方法. *石油物探*, 2013, 52(1): 35–42
- [16] Alkhalifah T, Tsvankin I. Velocity analysis for transversely isotropic media. *Geophysics*, 1995, 60(5): 1550–1566
- [17] Alkhalifah T. Velocity analysis using nonhyperbolic moveout in transversely isotropic media. *Geophysics*, 1997, 62(6): 1839–1854
- [18] Ursin B, Stovas A. Travetime approximations for a layered transversely isotropic medium. *Geophysics*, 2006, 71(2): D23–D33
- [19] Fomel S, Stovas A. Generalized nonhyperbolic moveout approximation. *Geophysics*, 2010, 75(2): U9–U18
- [20] Behera L, Khare P, Sarkar D. Anisotropic P-wave velocity analysis and seismic imaging in onshore Kutch sedimentary basin of India. *Journal of Applied Geophysics*, 2011, 74: 215–228
- [21] Stovas A, Fomel S. Generalized nonelliptic moveout approximation in tau-p domain. *Geophysics*, 2012, 77(2): U23–U30
- [22] 张军华, 臧胜涛, 孟宪军, 等. 大偏移距地震资料各向异性动校正方法研究及效果分析. *物探化探计算技术*, 2012, 35(5): 527–532
- [23] Brandsberg-Dahl S, Ursin B, de Hoop M V. Seismic velocity analysis in the scattering-angle/azimuth domain. *Geophysical Prospecting*, 2003, 51: 295–314
- [24] Abbad B, Ursin B, Rappin D. Automatic nonhyperbolic velocity analysis. *Geophysics*, 2009, 74(2): U1–U12
- [25] Efron B. Bootstrap methods: another look at the jackknife. *Annals of Statistic*, 1979, 7(1): 1–26
- [26] Sacchi M D. A bootstrap procedure for high-resolution velocity analysis. *Geophysics*, 1998, 63(5): 1716–1725
- [27] Abbad B, Ursin B. High-resolution bootstrapped differential semblance. *Geophysics*, 2012, 77(3): U39–U47
- [28] 刘国华. 高分辨率归一化自举微分相似系数速度分析方法. *石油物探*, 2014, 53(5): 530–536
- [29] Choi H, Byun J, Seol S J. Automatic velocity analysis using bootstrapped differential semblance and global search methods. *Exploration Geophysics*, 2010, 41: 31–39