

基于非线性变时窗相干算法的 不连续性检测方法

蔡涵鹏^{*①} 胡光岷^① 贺振华^② 王梦^③ 贺锡雷^②

(^①电子科技大学资源与环境学院,四川成都 611731; ^②成都理工大学复杂油气藏地球物理研究所,四川成都 610059;

^③中国石油川庆钻探工程有限公司地球物理勘探公司,四川成都 610213)

蔡涵鹏,胡光岷,贺振华,王梦,贺锡雷. 基于非线性变时窗相干算法的不连续性检测方法. 石油地球物理勘探, 2016,51(2):371-375.

摘要 为了提高相干体技术刻画地震数据体中地层细微不连续性特征的精度,提出了一种基于非线性变时窗的相干算法。与基于本征结构的相干体技术 C3 相比,该方法包括三项关键技术:①利用时频分析方法计算的瞬时中心频率自适应地确定相干体属性的时窗长度;②应用 Kendall 秩相关分析代替 Pearson 相关分析构建用于计算相干属性的正定矩阵;③采用信息散度作为分析点相干度量。实际资料应用结果表明:此法计算的相干体属性不仅压制了沿同相轴分布的低相干条带假同相轴,取得了较好的地层细微不连续性检测效果,而且计算效率得到显著的提高。

关键词 相干体 不连续性 Kendall 秩相关分析 瞬时中心频率 信息散度

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2016.02.022

1 引言

在三维叠后地震数据解释中,应用相干体技术快速描述地层、岩性体边界等横向非均质性,进而研究断层、微断裂的空间展布、地质构造异常及岩性的整体空间展布特征。该技术揭示了波场的空间变化规律,直接从三维地震数据体中获取断层和地层信息,不受任何解释误差的影响,极大地提高了解释精度,因而被广泛应用于油气勘探和开发中^[1]。自 Bahorich 等^[2]将相干体技术应用于石油勘探以来,此技术得到迅速发展,其中基于本征结构的相干体技术具有抗性好、分辨率高等优势,被工业界广泛应用,但是该技术也存在一些不足。C3 算法中应用 Pearson 相关系数度量地质体和非均质性的不连续性,构建用于相干属性计算的协方差矩阵。Pearson 相关系数可以检验变量之间是否独立,是建立在变量服从正态分布的假设基础之上,属于参数统计方法^[3]。

若变量总体非正态分布,采用此方法就会得到错误的结论。为了压制不利于不连续性检测的沿层低相干条带和随机噪声,保证相干体的聚焦能力和时间—空间分辨率,通常人为设定计算相干属性的时窗长度。固定时窗长度无法满足地震数据频带范围随着时间增大而变窄和地层厚度横向变化导致的地震波频带变化的要求。为此,笔者提出一种基于非线性变时窗的相干算法,从地震数据体中提取地层细微不连续性的特征信息。研究方法包括三项关键技术:①由于 Kendall 秩相关系数从二维随机样本是否协同一致来检验两变量之间是否存在相关性,与总体分布无关^[4],适用于数据集非正态分布的条件,因此用 Kendall 秩相关系数代替 Pearson 相关系数构建正定矩阵;②通过时频分析计算分析点的瞬时中心频率,自适应地确定时窗长度,使得计算相干属性的时窗长度更加合理;③为了提高相干属性的计算效率,借助标准化信息散度作为相干程度的度量,避免采用幂法求解矩阵特征值的耗时计算。

* 四川省成都市华阳大道一段 216 号中国石油川庆钻探工程有限公司地球物理勘探公司,610213。Email:hanpengcai@uestc.edu.cn
本文于 2014 年 12 月 5 日收到,最终修改稿于 2015 年 12 月 23 日收到。

本研究受电子科技大学科研启动基金项目(ZYGX2015KYQD049)和国家自然科学基金项目(41374111、41374134)联合资助。

2 方法理论

2.1 Kendall 秩相关系数及优势分析

在统计学中, Kendall 秩相关系数 ψ 用来测量两个随机变量相关性的统计值。Kendall 秩相关系数的取值范围为 $[-1, 1]$ 。当 $\psi=1$ 时, 表示两个随机变量拥有一致的等级相关性; 当 $\psi=-1$ 时, 表示两个随机变量拥有完全相反的等级相关性; 当 $\psi=0$ 时, 表示两个随机变量是相互独立的。

假设两个随机变量分别表示为集合 \mathbf{X}, \mathbf{Y} , 其对应元素组成一个元素对集合 $\phi = \{X_i, Y_i\} (1 \leq i \leq N)$ 。当集合 ϕ 中任意两个元素 $\{X_i, Y_i\}$ 与 $\{X_j, Y_j\}$ 的排行满足 $(X_i - X_j)(Y_i - Y_j) > 0$ 时, 这两个元素就被认为是一致的; 满足 $(X_i - X_j)(Y_i - Y_j) < 0$ 时, 两个元素被认为是不一致的; 当 $(X_i - X_j)(Y_i - Y_j) = 0$ 时, 这两个元素既不一致也不完全相同。

计算 Kendall 秩相关系数值有三种方法^[4], 分别适用于集合 \mathbf{X} 或 \mathbf{Y} 中元素满足不同的情况。地震道数据构成的集合 \mathbf{X} 或 \mathbf{Y} 中存在相同元素的情况, 计算 Kendall 秩相关系数 ψ 的公式为

$$\psi = \frac{A - B}{\sqrt{(N_3 - N_1)(N_3 - N_2)}} \quad (1)$$

式中: A 表示集合 ϕ 中一致性元素对的个数; B 表示 ϕ 中不一致性元素对的个数; $N_3 = \frac{1}{2}N(N-1)$,

N 为序列的长度; $N_1 = \sum_{i=1}^s \frac{1}{2}u_i(u_i - 1)$, 将 \mathbf{X} 中的相同元素分别组合成小集合, s 表示集合 \mathbf{X} 包含小集合的个数, u_i 表示第 i 个小集合所包含元素的个数; $N_2 = \sum_{i=1}^l \frac{1}{2}v_i(v_i - 1)$, 将 \mathbf{Y} 中的相同元素分别组合成的小集合, l 表示集合 \mathbf{Y} 包含小集合的个数, v_i 表示第 i 个小集合所包含元素的个数。

为了验证 Kendall 秩相关系数、Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数度量两个信号非相似度的优势, 计算了一个与零相位子波的振幅、频率相同, 相位从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 变化的子波的三种相关系数(图1)。可以看出, 与 Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数比较, Kendall 秩相关系数对子波的变化更加敏感, 为细微不连续性的检测奠定了基础。图2为不同频率子波的 Kendall 秩相关系数曲线。可以看出, 子波频率越高, Kendall 秩相关

系数对子波的变化越敏感, 表明地震数据的分辨率越高, 基于 Kendall 秩相关系数方法检测细微不连续性的能力越强。

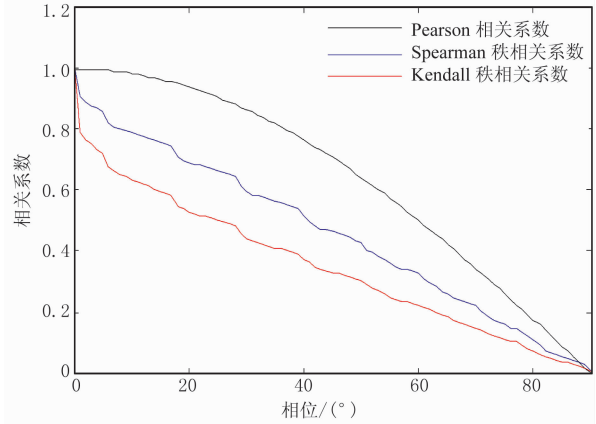


图1 不同相位子波的相关系数曲线比较

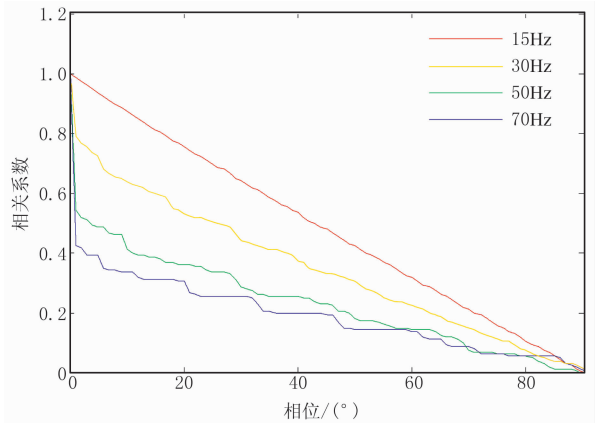


图2 不同频率子波的 Kendall 秩相关系数曲线比较

2.2 时窗长度计算

地震数据浅层频带宽, 深层频带窄, 且地层厚度变化会引起地震波频带发生时间—空间变化, 因此固定时窗的相干体计算不能兼顾聚焦能力和时间分辨率。为此采用变时窗长度计算分析点的相干属性。瞬时中心频率能较好地反应地震数据频率随时间—空间的变化。本次研究瞬时中心频率的计算采用时频分析技术中的 S 变换。

设分析信号满足 $x(t) \in L^2(\mathbb{R})$, 其 S 变换为^[5]

$$ST(f, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}\right] \times \exp(-i2\pi ft) dt \quad (2)$$

式中: $x(t)$ 为分析信号; f 为频率; τ 为时窗函数的中心时间。

地震波 t 时刻的瞬时中心频率 f_c 为

$$f_c = \frac{\int_0^{+\infty} f |ST(f, t)|^2 df}{\int_0^{+\infty} |ST(f, t)|^2 df} \quad (3)$$

通常计算相干体的时窗长度选择为 $\frac{T}{2} \sim \frac{3T}{2}$ (T 为地震波的视周期, $T = f_c^{-1}$)。为此,时窗长度 L 与瞬时中心频率之间的关系表示为

$$L = \xi f_c^{-1} \quad (4)$$

式中 ξ 为常数,通常取值为 0.5~1.5。当地震数据信噪比较高时,取较小值,反之,取较大值。

2.3 基于非线性相关变时窗的相干体计算

由确定的时间—空间窗以及地层视倾角 (p, q) 提取的计算相干属性的子体数据用矩阵表示为

$$\mathbf{U}_{L \times J}(t, p, q) = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1J} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{L1} & d_{L2} & \cdots & d_{LJ} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: d 为地震道数据; J 为参与计算相干属性的地震道数。

计算式(5)中两道地震数据之间的 Kendall 秩相关系数,构建正定矩阵

$$\mathbf{U}_\psi(t, p, q) = \begin{bmatrix} \psi_{11} & \psi_{12} & \cdots & \psi_{1J} \\ \psi_{21} & \psi_{22} & \cdots & \psi_{2J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{J1} & \psi_{J2} & \cdots & \psi_{JJ} \end{bmatrix} \quad (6)$$

常规 C3 算法需要求取特征值,计算非常耗时。Yang 等^[6]应用标准化信息散度作为分析点相干度量,即

$$C_M(t, p, q) = 1 + \frac{\lg \left\{ \frac{\text{Tr}(\mathbf{U}_\psi^\alpha)}{[\text{Tr}(\mathbf{U}_\psi)]^\alpha} \right\}}{\lg(J^{\alpha-1})} \quad (7)$$

式中: $\alpha > 0$, 且 $\alpha \neq 1$; Tr 表示求矩阵对角线元素的和。图 3 为不同 α 值计算的信息散度值。从图 3 可以看出, α 值越小,信息散度值差异越大,即区别能力越强。由于地震数据受噪声的影响,当信噪比较高时, α 取较小值,反之,取较大值。

最后,将所有倾角组合中计算获得的最大信息散度作为分析点度量不连续性的输出,即

$$C(t) = \max\{C_M(t, p, q)\} \quad (8)$$

2.4 计算步骤

根据以上分析,本文方法的主要计算步骤如下:

(1)应用 S 变换时频分析方法计算分析点处的瞬时中心频率,并按照式(4)确定计算分析点相干属性的时窗长度;

(2)设置视倾角的扫描范围和参与计算相干属性计算的地震数据道数;

(3)给定一组视倾角,提取分析点的相邻地震道数据,表示为式(5)的矩阵;

(4)应用 Kendall 秩相关系数构建式(6)描述的正定矩阵;

(5)按照式(7)计算正定矩阵的信息散度;

(6)应用步骤(3)~步骤(5)计算其他视倾角组合的信息散度;

(7)将所有倾角组合中计算的最大信息散度作为分析点的不连续性的度量。

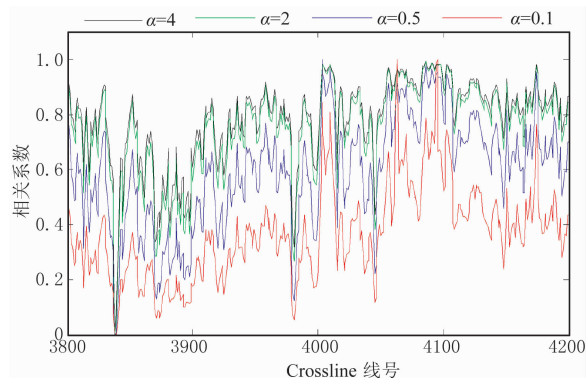


图 3 不同 α 值计算的信息散度比较

3 实例分析

为了验证本文方法的效果,应用基于本征结构相干技术(C3)和本文方法处理 B 区实际三维地震数据体。地震数据体包括 401 条主测线、401 条联络测线。每一道地震数据的时间采样点数为 500 个。在相同的 PC 微机处理条件下,C3 算法中的本征结构值采用幂法计算,处理整个数据体耗时约 157min,而本文方法计算时间约为 42min,仅仅约为 C3 算法计算时间的四分之一。

图 4 为三维地震数据主测线方向的原始地震剖面及相应中心频率和相干体数据属性剖面。由图 4b 可以看出,由于地震波受地层吸收和地层厚度变化的影响,整个地震数据体中瞬时中心频率范围约为 20~65Hz,意味着不同分析点处的相干体需要不同的计算时窗长度,时窗过长,跨越多个同相轴,

降低聚焦能力和时间分辨率,难以刻画细节;时窗过短,在地震同相轴零点附近的相干值计算因受噪声影响,降低了描述不连续性的精度。

图 4a 地震剖面上的大断层虽然在 C3 相干属性剖面上(图 4c)能够清晰地显示,但是明显降低了地震剖面的垂向分辨率,并且固定时窗导致断层出现阶梯状及沿同相轴分布的低相干条带假同相轴,无法准确突出地层的连续性。本文方法不仅很好地刻画出地震数据体中断层位置,增强了断层的连续性,压制了低相干条带假同相轴干扰,突出了地层细微的不连续性,而且还保持了地震资料的垂向分辨

率和信噪比(图 4d)。

图 5 为三维地震数据体和相干属性体的沿层切片对比。由图 5a 可见,原始地震数据的沿层切片展示了部分大断层、岩性体边界。对应的 C3 相干属性体沿层切片对大断层、岩性变化快的不连续性特征有较好的刻画,但由于计算时窗长度固定,导致局部沿同相轴分布的低相干条带假同相轴干扰增强,产生了错误的不连续性识别(图 5b)。本文方法计算的相干属性体能较好地刻画出断层、岩性体边界的横向展布形态,反映细微的岩性变化,且横向分辨率和信噪比均未受到损害(图 5c)。

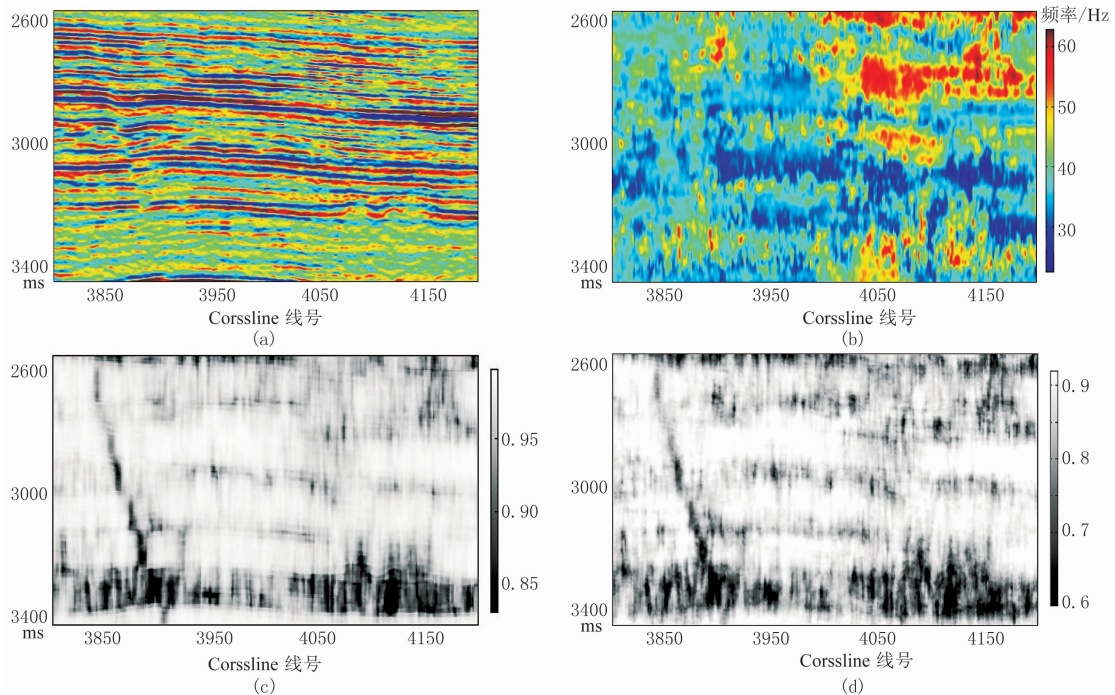


图 4 主测线方向原始地震剖面及相应主频率和相干数据体剖面

(a)原始地震剖面;(b)基于时频分析的瞬时中心频率剖面;(c)基于本征结构固定时窗相干属性剖面(时窗长度为 80ms);(d)本文方法相干属性剖面

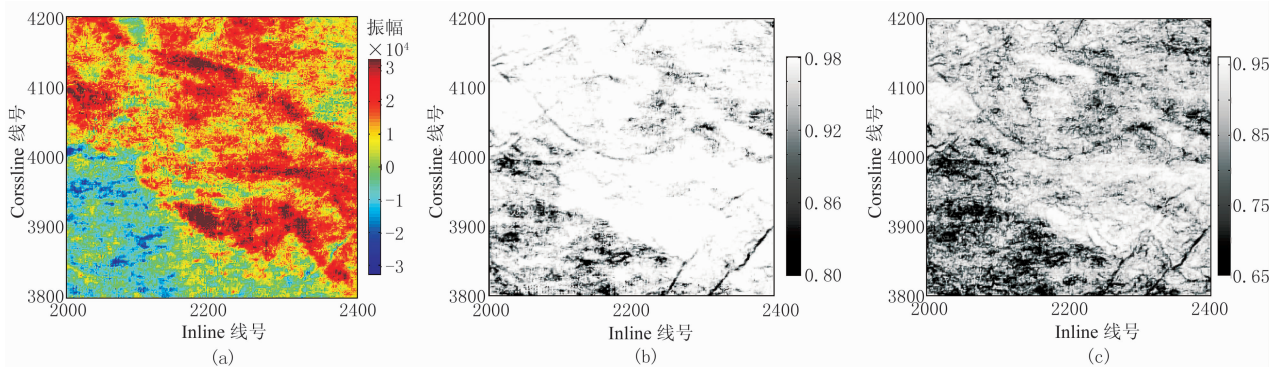


图 5 地震原始数据体和相干属性体的沿层切片对比

(a)沿层振幅切片;(b)C3 相干属性体沿层切片;(c)本文方法计算的相干属性体沿层切片

4 结论

(1) 基于非线性变时窗相干体技术能根据地震资料的频带宽度自适应确定时窗长度, 弥补了传统相干体固定时窗计算方法的缺陷。

(2) 利用 Kendall 秩相关系数替代 Pearson 相关系数构建协方差矩阵, 克服了数据集必须满足正态分布的假设, 提高了细微不连续性(如微断裂、规模小的岩性体边界等)的检测能力。

(3) 与常规 C3 相干体由幂法求取特征值作为分析点相干度量相比, 应用信息散度作为分析点相干度量显著地提高了计算效率。

参考文献

- [1] Chopra S, Marfurt K J. Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization. SEG, 2007, 45-71.
- [2] Bahorich M, Farmer S. 3D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube. The Leading Edge, 1995, 14(9):1053-1058.
- [3] Bolboaca S, Jantschi L. Pearson versus Spearman,

Kendall's tau correlation analysis on structure-activity relationships of biologic active compounds. Leonardo Journal of Sciences, 2006, 59(2):179-200.

- [4] Kendall M G. A new measure of rank correlation. Biometrika, 1938, 30(1-2):81-93.
- [5] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum; the S transform. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4):998-1001.
- [6] Yang T, Zhang B, Gao J. A fast coherence algorithm for seismic data interpretation based on information divergence. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2013, 32:2554-2558.

(本文编辑:金文昱)

作者简介



蔡涵鹏 博士, 1983 年生; 2006 年毕业于成都理工大学勘查技术与工程专业, 获工学学士学位; 2009 年和 2012 年分别毕业于成都理工大学地球探测与信息技术专业, 获得工学硕士和工学博士学位。现在电子科技大学资源与环境学院从事岩石物理、地震数据噪声衰减、流体识别和综合储层识别等领域的教研工作。

(上接第 360 页)

- [15] 凌云, 郭建明, 郭向宇等. 油藏描述中的井震时深转换技术研究. 石油物探, 2011, 50(1):1-13.
Ling Yun, Guo Jianming, Guo Xiangyu et al. Research on time-depth conversion by well-to-seismic in reservoir characterization. GPP, 2011, 50(1):1-13.
- [16] 严又生. 速度横向变化对小幅度构造解释的影响. 石油地球物理勘探, 1994, 29(6):758-768.
Yan Yousheng. The influence of lateral velocity change on small structure interpretation. OGP, 1994, 29(6):758-768.
- [17] 匡文忠. 地震勘探原理. 北京: 电子科技大学出版社, 2000.
- [18] 牟永光, 陈小宏, 刘洋等. 地震数据处理方法. 北京: 石油工业出版社, 2007, 140-142.
- [19] 何晓冬, 王峰, 庞二宽等. 井约束模型法速度分析技术在塔里木地区的应用. 地球物理学进展, 2011, 26(4):1378-1385.
He Xiaodong, Wang Feng, Pang Erkuan et al. Application of velocity analysis technology based on well control modeling method in Tarim basin area. Progress in Geophysics, 2011, 26(4):1378-1385.

- [20] 陈洪涛, 王迪强, 李玉海等. 滨里海盆地东缘东南区块速度场研究与应用. 石油地球物理勘探, 2007, 42(增刊 1):26-29.
Chen Hongtao, Wang Diqiang, Li Yuhai et al. Study on velocity field of southeastern block in eastern margin of Precaspian Sea and application. OGP, 2007, 42(S1):26-29.

(本文编辑:刘勇)

作者简介



王珊 工程师, 1984 年生; 2007 年毕业于东北石油大学勘查技术与工程专业, 获工学学士学位; 2010 年毕业于东北石油大学地球探测与信息技术专业, 获硕士学位; 长期从事地震资料解释及其方法研究, 目前在大庆油田勘探开发研究院从事与地震勘探相关的生产和科研工作。