

· 综合研究 ·

高阶统计量相干法在建南构造生物礁储层预测中的应用

杨振武*^{①②} 朱培民^③ 曾凡平^④

①中国石油大学(北京),北京昌平 102249; ②江汉油田分公司勘探开发研究院,湖北潜江 433124;

③中国地质大学(武汉),湖北武汉 430074; ④东方地球物理公司研究院大港分院,天津 300280)

杨振武,朱培民,曾凡平. 高阶统计量相干法在建南构造生物礁储层预测中的应用. 石油地球物理勘探, 2010, 45(5): 705~709

摘要 基于高阶统计量具有检测和表征信号中的非线性等特点,文中提出了用高阶统计量识别和预测生物礁储集层的新方法,其目的是通过高阶统计量检测出生物礁的非高斯性信息,预测生物礁储层的存在。文中针对高阶矩对非高斯信号比较敏感,特别是偏离高斯性的程度越大、高阶矩越大的特性,将二阶相关的相干体算法类推到三阶、四阶,提取主要反映高斯偏离程度的高阶相干切片。结果表明,约90%的地震道都服从广义高斯分布。高阶相干体能较好地预测生物礁体的分布。

关键词 生物礁 储层预测 广义高斯分布 高阶统计量 相干切片

1 引言

生物礁是由地质历史时期各种各样的造礁生物堆积后经固结成岩作用而成,其内部孔隙和孔洞非常发育,且孔隙和孔洞之间连通性好,可作为优良的油气储层。生物礁常常紧邻礁后泻湖和半深海盆地等有利生油场所,利于油气生成后从烃源岩就近运移到生物礁储集层内富集成藏,是碳酸盐岩油气勘探的重要目标之一。目前预测生物礁相储集层的主要依据是地震剖面的反射特征,这些特征可归结为:①外观上表现为丘状、透镜状、弧状等,且礁体边缘常出现上超、绕射等现象;②生物礁体内部,地震记录的振幅、频率和相位与围岩差别较大,礁体内部反射杂乱或无反射等;③生物礁体与围岩存在明显的速度差异,时间剖面上有礁的部位常出现上拉或下拉现象。现有资料表明,具有上述典型反射特征的生物礁也只是少数,大多数生物礁体不具备上述明显的地震反射特征,仅依据反射特征进行生物礁相储层预测,必然会出现较大误差。实际地震资料分析表明,在沉积稳定的地区,大多数地震信号都可以看做广义高斯序列。但是当裂缝、孔洞、断裂带存

在时,穿过这些区域的地震波反射特征会发生变化,反射地震信号就会偏离广义高斯的统计特性^[1~3]。岩石物性研究表明,生物礁内部具有很强的非均质性和速度各向异性^[2]。因此当地震波穿过生物礁体时,因其强烈的非均质性和各向异性可能产生非高斯的、非对称分布的或非线性的信号,并记录到地震反射波中。熊晓军等利用高阶统计量比功率谱函数具有对高斯噪声不敏感的优点及地震信号的高阶谱特征,提出了一种利用地震属性高阶谱特征参数进行油气检测和识别的方法^[4]。王书民等根据高阶统计量有关理论和方法提出了双谱和互双谱高阶时频分析方法,检测碳酸盐岩中由孔、洞、缝等引起的非均匀储集体的方法^[3]。高云等提出了多尺度高阶累积量的相关分析技术,用于砂体预测^[5]。

鉴于高阶统计量具有可提取出由于高斯性偏离引起的统计特征变化,能够检测和表征信号中的非线性等特点,笔者提出了用高阶统计量(主要是高阶)识别和预测生物礁储集层的新方法,其目的是通过高阶统计量检测出生物礁的非高斯性信息,预测生物礁储层的存在。由于高阶统计量分析方法在处理非线性、非高斯性地震信号方面具有优势,在地震数据处理和解释中已得到广泛应用,文中设计了三

* 湖北省潜江市江汉油田分公司勘探开发研究院,433124

本文于2009年9月18日收到,修改稿于同年11月17日收到。

阶、四阶相干算法,并应用于建南构造生物礁储层预测,取得了良好的效果。

2 地震信号的统计特征

文献[2]对多个地区地震信号的统计结果表明,叠后和偏移的地震道时间序列都呈现出广义高斯分布的统计特性。本文根据 Kolmogorov-Smirnov 检验方法,对湖北利川县建南工区的三维地震数据(图1),用文献[3]提出的方法,进行了广义高斯假

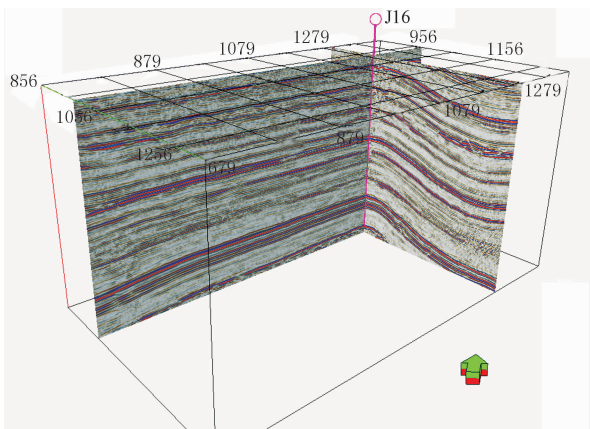


图1 建南工区三维地震数据

三维地震剖面地震道总共 358288 道,采样间隔为 1ms,每道采样点数为 1985 个,统计时间范围为 595~2579ms

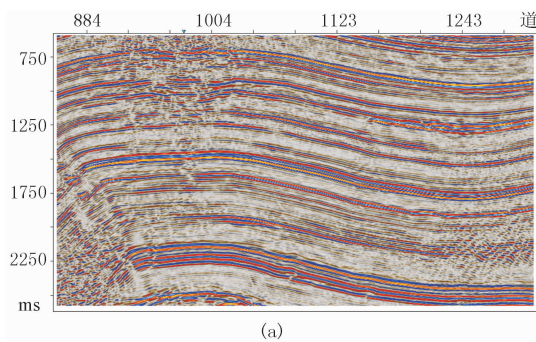


图3 Inline 1305 测线地震剖面(a)及估计出的广义高斯分布形状参数(b)、尺度参数(c)

3 高阶相干的原理

相干技术经常用于地震解释中,参数合适的三维相干体能清楚地再现断层特征及其分布。用于地震数据处理和解释的相干算法有三类,即 Bahorich 等提出的第一代基于相关的算法(C1) [7],Marfurt 等提出的第二代基于相似系数的算法(C2) [8]以及 Marfurt 等提出的第三代基于本征结构分析(C3)的

设检验,图2为广义高斯假设检验结果,由图中可见,服从广义高斯分布的地震道占 89.58%。图3为 Inline 1305 测线地震剖面和广义高斯估计的形状参数、尺度参数。由图中可见,形状参数 α 基本上都分布在 0.6~1.6 之间,与 Walden 等统计的地震反射序列 α 的范围基本一致 [6],且广义高斯符合率为 89.93%。

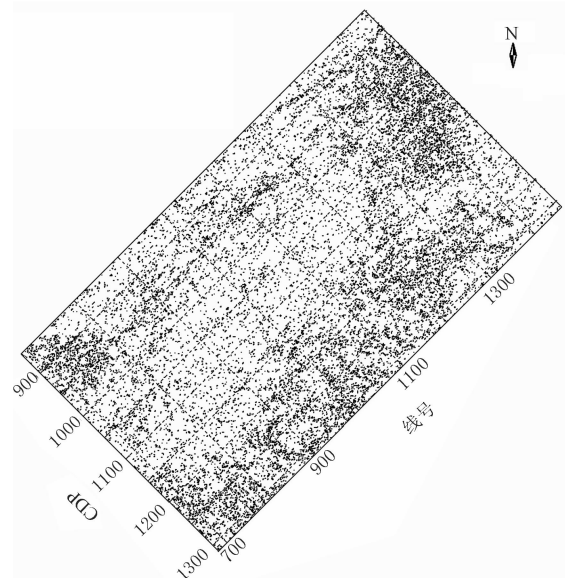
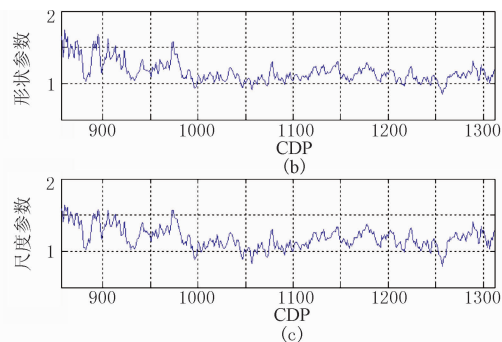


图2 广义高斯假设检验结果

黑点:不服从广义高斯分布地震道;空白:服从广义高斯分布地震道



算法 [9]。尹成、熊晓军等在 C1 算法基础上,提出一种新的基于高阶统计量相干体的算法,并将其应用于砂体沉积演化分析,拓宽了相干体技术的应用领域 [10,11]。为了说明本文采用的三阶和四阶高阶相干的定义和计算方法,文中首先从二阶相干体定义和算法开始讨论。

3.1 C1 相干体算法

基于离散信号的相关系数可以衡量信号的相似性,建立了 C1 相干算法。对于三维地震数据体,采

样点 A 的相干值由 A、B 两点的相关系数和 A、C 两点的相关系数确定(图 4),定义 t 时刻纵测线上 A、B 两点的互相关系数 ρ_x 为

$$\rho_x(t, l, x_i, y_i) = \frac{\sum_{\tau=-w}^w u(t-\tau, x_i, y_i)u(t-\tau-l, x_{i+1}, y_i)}{\sqrt{\sum_{\tau=-w}^w u^2(t-\tau, x_i, y_i) \sum_{\tau=-w}^w u^2(t-\tau-l, x_{i+1}, y_i)}} \quad (1)$$

式中: $u(t, x_i, y_i)$ 和 $u(t, x_{i+1}, y_i)$ 分别代表 A 和 B 两点的地震道在 t 时刻的取值; l 为 B 点地震道相对 A 点地震道的延迟时间; $2w+1$ 为相关时窗长度。

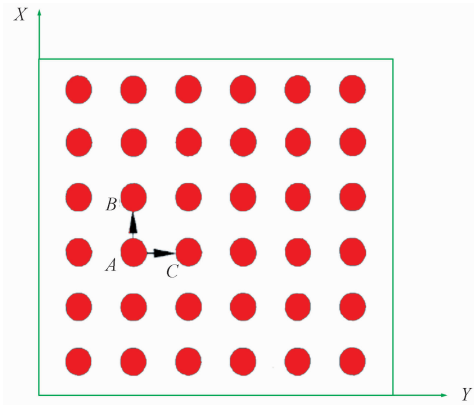


图 4 相干值计算地震道选取示意图
红圆点代表地震道位置

类似地,定义 t 时刻横测线上 A、C 两点的互相关系数 ρ_y 为

$$\rho_y(t, m, x_i, y_i) = \frac{\sum_{\tau=-w}^w u(t-\tau, x_i, y_i)u(t-\tau-m, x_i, y_{i+1})}{\sqrt{\sum_{\tau=-w}^w u^2(t-\tau, x_i, y_i) \sum_{\tau=-w}^w u^2(t-\tau-m, x_i, y_{i+1})}} \quad (2)$$

式中: $u(t, x_i, y_{i+1})$ 分别代表 C 点的地震道在 t 时刻的取值; m 为 C 点地震道相对 A 点地震道的延迟时间; $2w+1$ 为相关时窗长度。

将上面纵测线(延迟)和横测线(延迟)的相关系数组合起来,定义相关系数

$$\rho_{xy}(t, x_i, y_i) = \sqrt{\max_l[\rho_x(t, l, x_i, y_i)] \max_m[\rho_y(t, m, x_i, y_i)]} \quad (3)$$

式中 $\max_l[\rho_x(t, l, x_i, y_i)]$ 和 $\max_m[\rho_y(t, m, x_i, y_i)]$ 分别表示延迟时为 l 和 m 时,取 ρ_x 和 ρ_y 中的最大值。

C1 相干算法的最大优点就是可以分别沿三维地震数据的纵、横测线方向计算互相关系数,计算量小,易于实现。对于高质量的地震数据,时移 l 和 m 可分别近似计算出每道在 x 和 y 方向上的视时间倾角。对于含相干噪声的地震数据,仅用两道估计的视倾角误差将相当大,这也正是互相关算法的局限性。

3.2 高阶相干体算法

根据高阶统计量理论可知,高斯过程(或序列)三阶以上的累积量等于零,奇数高阶矩等于零。广义高斯过程(序列)的累积量和高阶矩值类似于高斯过程^[8],即偏离高斯性的程度越大,高阶矩越大。在前文已证明约 90% 的地震信号都可以看做广义高斯序列,因此高阶相干以三阶矩和混合四阶矩为基础,应该具有检测偏离高斯性地震信号的能力。

基于高阶统计量(HOS)的优点和 C1 算法的不足,以 C1 算法为基础,先构造三阶和四阶相干系数的计算方法,充分利用高阶统计量对高斯噪声的不敏感性,综合三阶和四阶相干的结果得到一个混合的高阶相干系数。文中混合四阶相干的定义来源于文献[10]。

3.2.1 三阶相干系数

同时组合纵向和横向上 A、B、C 三点地震道构造三阶矩函数,定义相关系数为

$$C_{\text{HOS3}}(t, \tau_1, \tau_2, x_i, y_i) = \frac{\sum_{\tau=-w}^w u(t-\tau, x_i, y_i)u(t-\tau-\tau_1, x_{i+1}, y_i)u(t-\tau-\tau_2, x_i, y_{i+1})}{\sqrt{\sum_{\tau=-w}^w u^2(t-\tau, x_i, y_i) \sum_{\tau=-w}^w u^2(t-\tau-\tau_1, x_{i+1}, y_i) \sum_{\tau=-w}^w u^2(t-\tau-\tau_2, x_i, y_{i+1})}} \quad (4)$$

式中: τ_1 为 B 点地震道相对于 A 点地震道的时间延迟, τ_2 为 C 点地震道相对于 A 点地震道的时间延迟,且 $\tau_1, \tau_2 \in (-w, w)$; $2w+1$ 为分析时

窗长度。

3.2.2 混合四阶相干系数

定义相关系数为

$$C_{\text{HOS}_4}(t, \tau_1, \tau_2, x_i, y_i) = \frac{\sum_{\tau=-\omega}^{\omega} u^2(t-\tau, x_i, y_i) u(t-\tau-\tau_1, x_{i+1}, y_i) u(t-\tau-\tau_2, x_i, y_{i+1})}{\sqrt{\sum_{\tau=-\omega}^{\omega} u^4(t-\tau, x_i, y_i) \sum_{\tau=-\omega}^{\omega} u^2(t-\tau-\tau_1, x_{i+1}, y_i) \sum_{\tau=-\omega}^{\omega} u^2(t-\tau-\tau_2, x_i, y_{i+1})}} \quad (5)$$

式中的参数含义与式(4)相同。

3.2.3 混合相干体

综合三阶和四阶相干系数的计算结果,混合相干体在 A 点 t 时刻的相干系数定义为

$$\rho_{xy}(t, x_i, y_i) = \max_{\tau_1, \tau_2} [C_{\text{HOS}_3}(t, \tau_1, \tau_2, x_i, y_i), C_{\text{HOS}_4}(t, \tau_1, \tau_2, x_i, y_i)] \quad (6)$$

式中的参数含义与式(4)、式(5)相同。

4 高阶相干在建南三维区生物礁储层预测中的应用

研究区位于湖北省利川县建南构造及其周缘,目的层为建南构造上二叠统长兴组二段(底界反射层代号 T_{P2}),为晚二叠世鄂西和川、渝东开阔台地内的点礁或塔礁,礁体规模小。在建南构造上钻探的 J16 井曾获得高产工业性气流,成为中国第一个

礁型气藏^[12,13]。以往曾按构造气藏类型布井,成功率较低,勘探一度停滞不前。图 5 为 2007 年采集的过 J16 井的地震剖面,由图中可见,在 Crossline 977 剖面(图 5a)上存在较典型的生物礁建隆现象,即礁体内部反射杂乱或无反射,在礁体上部地震同相轴中断,出现明显“烟囱”效应。经过多次试验,选择沿层相干的方法得到了相干体沿层切片,预测结果良好。图 6 为沿长二段(T_{P2})底界上、下开 35ms 时窗,由不同算法得到的相干体切片,由图中可见:在 C1 算法中(图 6a),地形呈南低北高,礁呈南北走向,呈条带状, J16 井打在礁 C 的北部高点上,效果较差; $C_{\text{HOS}_3} + C_{\text{HOS}_4}$ 算法(图 6d)勾绘出了生物礁体的范围,与文献[12]相比,异常范围扩大了,且增加了南、北侧两个礁异常体,效果较好。图 6 表明,运用高阶相干体方法预测礁更为精细、可靠,可为下步勘探提供依据。

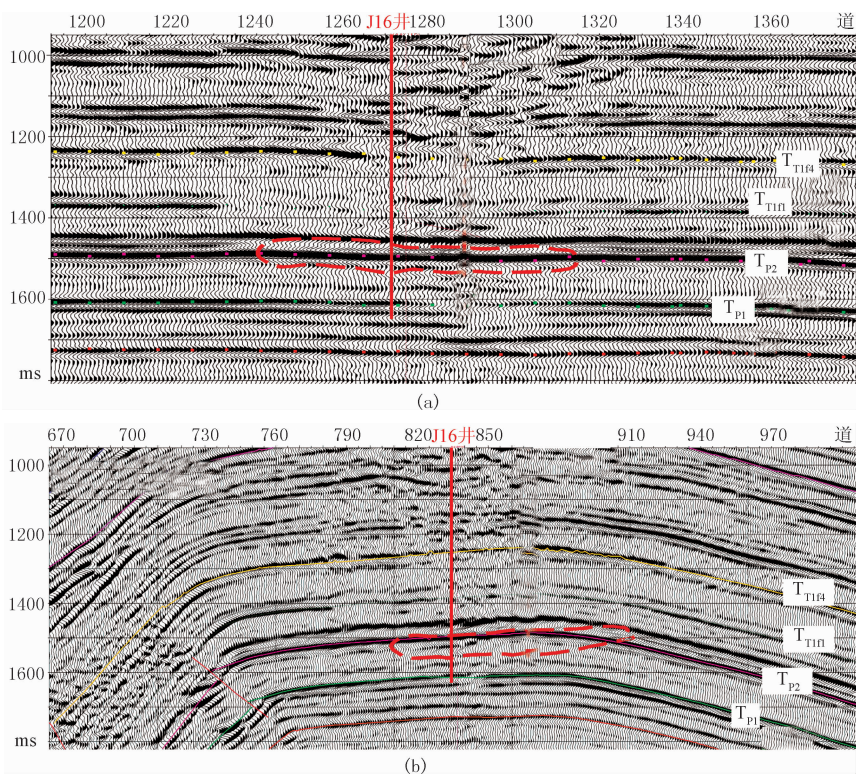


图 5 过 J16 井地震剖面

(a) Crossline 977 剖面; (b) Inline 1305 剖面

J16 井钻探在图中红色虚线所示的礁体上,礁体所在位置的时间深度约为 1450ms,且获高产天然气流

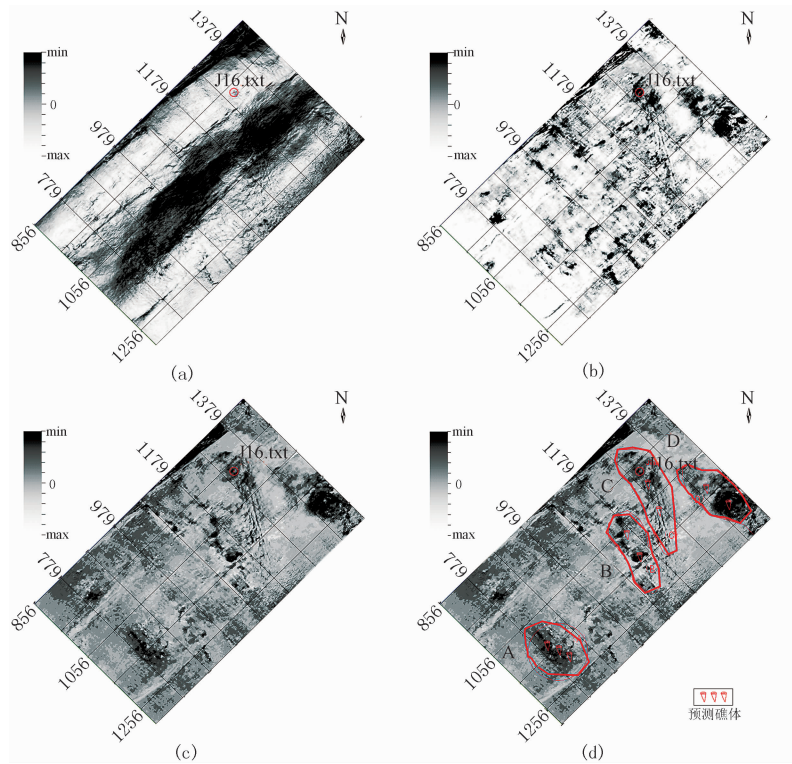


图 6 沿长二段(T_2)底界上、下开 35ms 时窗由不同算法得到的相干体切片

(a)C1 算法; (b)CHOS₃算法; (c)CHOS₁算法; (d)CHOS₃ + CHOS₁算法

图中的等深线为长二段的时间深度, T_2 是与二叠系长兴组底界面对应的地震层位, A、B、C 和 D 代表了四个区域的生物礁体

6 结束语

本文从生物礁体内部的非均质和各向异性出发,根据高阶统计量对非高斯信号敏感的特性,提出了用高阶统计量(主要是高阶)识别和预测生物礁储集层的新方法,结果表明,工区约 90% 的地震道都服从广义高斯分布,将第一代相干算法类推到高阶相干算法,可用于突显生物礁在地震记录上所造成的非高斯性信息。C1 算法和高阶算法的对比结果说明,高阶相干体能较好地预测生物礁体的分布,结果更精细、可靠,对下步生物礁勘探具有借鉴意义。需要指出的是,本文的研究工作还是初步的,需要更多的实际数据进行检验。

参考文献

- [1] Zhu Peimin, Wang Jiaying, Zhan Qi. Higher-order statistics of seismic signal and its application. *Geophysics*, 2004, 69(1): 70~78
- [2] 张丽琴,詹麒,朱培民等. 地震散射波长的高阶统计分析. *石油地球物理勘探*, 2004, 39(1): 45~49
- [3] 王书明,朱培民,李宏伟等. 地球物理学中的高阶统计量方法. 北京:科学出版社, 2006
- [4] 熊晓军,贺振华,尹成等. 高阶统计量在油气地球物理勘探中的新应用. *地质科技情报*, 2005, 24(2): 77~84
- [5] 高云,宋维琪,刘仕友等. 地震资料高阶累积量相关法砂体预测. *地震地质*, 2007, 29(1): 88~94
- [6] Walden A T, Hosken J W. The nature of the non-Gaussianity of primary reflection coefficients and its significance for deconvolution. *Geophys Prop*, 1986, 34(7): 1038~1066
- [7] Bahorich M, Farmer S. 3-D seismic discontinuity for fault and stratigraphic features: The coherence cube. *The leading edge*, 1995, 14(10): 1053~1058
- [8] Marfurt K J, Kirlin R L, Farmer S L et al. 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm. *Geophysics*, 1998, 63(4): 1150~1165
- [9] Marfurt K J, Sudhaker V, Gersztenkorn A et al. Coherency calculations in the presence of structural dip. *Geophysics*, 1999, 64(1): 104~111
- [10] 熊晓军,尹成,张白林等. 一种新的基于高阶统计量的相干体算法. *工程地球物理学报*, 2004, 1(3): 278~281
- [11] 尹成,熊晓军,张白林等. 基于高阶统计量的相干体算法及砂体沉积演化分析. *石油学报*, 2005, 26(4): 58~62
- [12] 陈劲人,银玉光. 建南气田长兴组生物礁气藏的勘探实践. *石油勘探与开发*, 1981, 12: 27~33
- [13] 梁西文,郑荣才,张涛等. 建南构造晚二叠世长兴期点礁和滩的高精度层序地层与储层评价. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 33(4): 407~413

(本文编辑:刘勇)